

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت
Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Énergétiques
Thème

**Optimisation thermique d'un mur composite par l'intégration d'un PCM
pour l'amélioration du confort thermique des bâtiments.**

1. ZENASNI Feriel
2. ZERGA Ramyz Ahmed

Devant le jury composés de:

Pr. BOUAFIA Farida	Présidente	UATBB (Ain T'émouchent)
Pr. NEHARI Taieb	Encadrant	UATBB (Ain T'émouchent)
Mlle. ZEHOUANI Zahra Assala	Co-Encadreur	UATBB (Ain T'émouchent)
Pr.E. BOUNIF Abdelhamid	Examineur	UATBB (Ain T'émouchent)

Année universitaire 2025/2026

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-puissant de nous avoir donné la force, la patience et le courage pour mener à bien ce travail.

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrant, **Pr. NEHARI Taieb**, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de réalisation de ce mémoire.*

*Nous adressons également nos vifs remerciements à notre Co-encadreuse, **Mlle.ZEHOUANI Zahra Assala**, pour son aide, ses orientations et ses encouragements.*

Nous remercions s'étendent aussi aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et de consacrer leur temps à son examen.

*Nous remercions l'ensemble des enseignants du département de **Génie mécanique** de l'Université Belhadj Bouchaib d'Ain Témouchent pour la qualité de leur formation et leurs efforts durant notre parcours universitaire.*

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à nos familles, ainsi qu'à tous nos amis et collègues, pour leur soutien moral, leur patience et leurs encouragements permanents.

Dédicaces

Tout d'abord, Je tiens à dédie mon directeur de mémoire, professeur

{Pr. NEHARI Taieb}

Je tiens à dédier ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers à ceux qui ont fait de moi ce que je suis mes très chers parents pour qui je n'oublierai jamais leur grande affection, leur soutien et leurs encouragements, tout le long de ma vie.

Je dédie ce travail, à mes très chers grands parents, mes sœurs et mon frère et surtout ma cousine.

A toute ma famille.

La famille ZERGA et ZENASNI

A tous mes collègues de la promotion Energétique 2025/2026.

Bien sûr à mes chers amis.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'optimisation thermique d'un composite intégrant un matériau à changement de phase afin d'améliorer le confort thermique des bâtiments et de réduire la consommation énergétique. Les MCP permettent de stocker et restituer la chaleur sous forme de chaleur latent lors des changements de phase solide/liquide, ce qui contribue à limiter les variations de température intérieure.

L'étude repose sur une modélisation numérique réalisée sous ANSYS Fluent en utilisant la méthode enthalpie-porosité pour simuler les phénomènes de transfert thermique et de changement de phase. Plusieurs paramètres ont été analysés, notamment le type de MCP, son épaisseur et son association avec des techniques passives d'isolation. Les résultats montrent que l'intégration des MCP améliore l'inertie thermique des murs, réduit les flux thermiques et contribue à un meilleur confort thermique tout en diminuant les besoins en chauffage et en climatisation.

Mots-clés : MCP, stockage thermique, mur composite, confort thermique, simulation numérique, efficacité énergétique.

Abstract

This thesis focuses on the thermal optimization of a composite wall incorporating a phase change material (PCM) in order to improve thermal comfort in buildings and reduce energy consumption. PCMs can store and release heat in the form of latent heat during solid/liquid phase transition, which helps limit indoor temperature fluctuations.

The study is based on a numerical simulation carried out using ANSYS Fluent and the enthalpy-porosity method to model heat transfer and phase change phenomena. Several parameters were analyzed, including the type of PCM, its thickness, and its combination with passive insulation techniques. The results show that integrating PCMs improves the thermal inertia of walls, reduces heat flux, and enhances indoor thermal comfort while decreasing heating and cooling energy demands.

Keywords: phase change materials (PCM), thermal storage, composite wall, thermal comfort, numerical simulation, energy efficiency.

ملخص

تركز هذه الأطروحة على التحسين الحراري لجدار مركب يدمج مادة تغيير الطور من أجل تحسين الراحة الحرارية في المباني وتقليل استهلاك الطاقة، ويمكن لمواد تغيير الطور تخزين وإطلاق الحرارة على شكل حرارة كامنة خلال الانتقال بين الطور الصلب والسائل، مما يساعد على الحد من تقلبات درجة الحرارة الداخلية.

الدراسة تعتمد محاكاة عددية أجريت باستخدام برنامج وطريقة الإنثالبية - المسامية لنمذجة انتقال الحرارة وظواهر تغيير الطور، وتم تحليل عدة معلمات، بما في ذلك نوع المادة القابلة لتغيير الطور، وسمكتها، ودمجها مع تقنيات العزل السلبية.

تظهر النتائج أن دمج المواد القابلة لتغيير الطور يحسن العزم الحراري للجدران، ويقلل من تدفق الحرارة، ويعزز الراحة الحرارية الداخلية مع خفض احتياجات التدفئة والتبريد من حيث الطاقة.

الكلمات المفتاحية: المواد القابلة لتغيير الطور، التخزين الحراري، الجدران المركبة، التخزين الحراري، الجدار المركب، الراحة الحرارية، المحاكاة العددية، كفاءة الطاقة.

Table de Matière

<i>Remerciement</i>	i
<i>Dédicace</i>	ii
<i>Résumé</i>	iii
<i>Table de matière</i>	v
<i>Liste des figures</i>	ix
<i>Liste de tableaux</i>	x
<i>Nomenclature</i>	xi

Introduction générale	2
-----------------------	---

Chapitre I : Contexte énergétique et performance thermique des bâtiments

I	Introduction	5
I.1	Contexte énergétique et environnemental	5
I.1.1	Consommation énergétique mondiale	5
I.1.2	Impact environnemental (émissions de CO ₂ , réchauffement climatique)	6
I.1.3	Contribution du secteur du bâtiment	8
I.2	Enveloppe du bâtiment et échanges thermiques	8
I.2.1	Définition de l'enveloppe du bâtiment	8
I.2.2	Rôle des murs, toitures et façades	9
I.2.3	Echanges thermiques entre intérieure et extérieur	9
I.2.4	Importance de la conception thermique	9
I.3	Modes de transfert de chaleur	10
I.3.1	Conduction	10
I.3.2	Convection	10
I.3.3	Rayonnement	11
I.4	Paramètres de performance thermique	12
I.4.1	Inertie thermique	12
I.4.2	Le déphasage thermique (time lag)	12
I.4.3	Facteur d'amortissement (décrément factor)	13

I.4.4	Confort thermique	14
I.5	Techniques actives de régulation thermique	14
I.5.1	La vibration des surfaces	15
I.5.2	La vibration des fluides	15
I.5.3	Champs électrostatiques	15
I.5.4	L'injection	15
I.5.5	Impact de jet	15
I.6	Techniques passives d'amélioration thermique	15
I.6.1	Isolation thermique	15
I.6.2	Ventilation naturelle	16
I.6.3	Protection solaire	16
I.6.4	Stockage thermique	16
I.6.4.1	Types de stockage thermique	17
I.6.4.2	Rôle de stockage thermique	19
I.7	Problématique du mémoire	20
I.8	Objectifs du travail	20

Chapitre II : Matériaux à changement de phase dans les bâtiments

II	Introduction	23
II.1	Stockage thermique par matériaux à changement de phase	23
II.1.1	Définitions et principes fondamentaux	23
II.1.1.1	Définition des matériaux à changement de phase (PCM)	23
II.1.1.2	Principe de fonctionnement des matériaux à changement de phase	23
II.1.2	Types de matériaux à changement de phase	24
II.1.2.1	PCM organiques	24
II.1.2.2	PCM inorganiques	25
II.1.2.3	PCM eutectiques	25
II.2	Propriétés des PCM	25
II.2.1	Critères de choix de PCM	26
II.2.2	Critères thermodynamiques	26
II.2.3	Critères chimiques	27
II.2.4	Critères économiques	27

II.3	Application des matériaux à changement de phase (PCM) dans les bâtiments	27
II.3.1	Introduction	27
II.3.2	Applications des MCP dans les bâtiments pour le refroidissement gratuit	27
II.3.3	Applications des MCP dans les bâtiments pour le déplacement des charges de pointe	28
II.3.4	Applications des MCP dans les bâtiments climatisés	29
II.3.5	Applications des MCP dans les bâtiments sans climatisation	29
II.4	Technique d'intégration des MCP dans les bâtiments	30
II.4.1	Encapsulation de matériaux à changement de phase	31
II.4.2	Macro-encapsulation	31
II.4.3	Micro-encapsulation	32
II.4.4	Absorbé dans une matrice	33
II.4.5	Matériaux à changement de phase à forme stabilisée	34
II.5	Conclusion	34

Chapitre III : Modélisation numérique et Méthodologie de Simulation

III	Introduction.	36
III.1	Qu'est-ce que la CFD	36
III.2	Présentation du logiciel ANSYS Fluent	36
III.2.1	Définition de modélisation numérique	37
III.2.1.1	Equation de continuité	37
III.2.1.2	Equation de conservation de la quantité de mouvement	38
III.2.1.3	Equation de conservation de l'énergie	38
III.3	La méthode d'enthalpie-porosité	38
III.4	Méthodologie sous Fluent	39
III.4.1	Création de la géométrie	39
III.4.2	Maillage	40
III.4.2.1	Maillage structuré recommandé	40
III.4.2.2	Raffinement près des parois	40
III.5	Paramétrage dans Fluent	41
III.6	Description du modèle physique	41
III.7	Hypothèses de modélisation	43

III.8	Condition aux limites	45
III.9	Validation du modèle	46

Chapitre IV : Résultats et Discussion

IV	Introduction	48
IV.1	L'effet du type de MCP sur les performances thermiques	48
IV.2	L'effet de l'épaisseur du MCP sur les performances thermiques	50
IV.3	L'effet d'utilisation de deux techniques passives de refroidissement	52
IV.4	Conclusion	54

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1	Evolution de la consommation mondiale de l'énergie primaire	6
Figure I.2	L'effet de serre	7
Figure I.3	Consommation mondiale d'énergie finale par secteur	8
Figure I.4	Le principe de la conduction thermique	10
Figure I.5	Convection thermique dans un fluide	11
Figure I.6	Le rayonnement thermique entre deux surfaces portées à des températures T_1 et T_2	12
Figure I.7	Le déphasage thermique	13
Figure I.8	L'amortissement	14
Figure I.9	Apporte et besoins sur une journée	16
Figure I.10	Changement de phase solide/liquide	18
Figure I.11	Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique	19

Chapitre II

Figure II.1	Principe de fonctionnement des Matériaux à Changement de Phase	24
Figure II.2	Types de Matériaux à Changement de Phase	25
Figure II.3	Intégration de MCP dans l'habitat	29
Figure II.4	Exemple de technique macro-encapsulation de MCP	32
Figure II.5	produit de MCP micro-encapsulation utilisé pour le stockage thermique dans le bâtiment	33
Figure II.6	Les différentes formes d'encapsulation	34

Chapitre III

Figure III.1	Vue générale sur ansys fluent	37
Figure III.2	Configuration d'un mur composite en brique intégrant une couche de matériaux à	42
	Changement de phase (MCP)	
Figure III.3	Validation du modèle numérique comparaison avec des résultats	46

Chapitre IV

Figure IV.1	Évolution de la température de la surface intérieure pour différents types de MCP	49
Figure IV.2	Évolution du flux thermique intérieur pour différents types de MCP	50
Figure IV.3	Effet de l'épaisseur du MCP sur la température de la surface intérieure	51
Figure IV.4	Effet de l'épaisseur du MCP sur le flux thermique intérieur	52
Figure IV.5	Impact de la combinaison MCP_EPS sur la température de la surface intérieure	53
Figure IV.6	Impact de la combinaison MCP_EPS sur le flux thermique intérieur	54

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableaux II.1	Applications potentielles de stockage de l'énergie thermique par les matériaux	30
---------------	--	----

Chapitre III

Tableau III.1	Propriétés des matériaux utilisés	42
---------------	-----------------------------------	----

Nomenclature

T	Température	$^{\circ}\text{C}/\text{K}$
T_i	Température intérieure	$^{\circ}\text{C}$
T_e	Température extérieure	$^{\circ}\text{C}$
T_f	Température de fusion	$^{\circ}\text{C}$
q	Flux thermique	W/m^2
Q	Quantité de chaleur	J
m	Masse	Kg
C_p	Chaleur spécifique	$\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$C_{p,s}$	Chaleur spécifique à l'état solide	$\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$C_{p,l}$	Chaleur spécifique à l'état liquide	$\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
L_f	Chaleur latente de fusion	J.Kg^{-1}
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
κ	Conductivité thermique	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
h	Enthalpie	J/Kg
h_s	Enthalpie de la phase solide	J/Kg
u, v	Composantes de vitesse	m/s
t	Temps	s
ϕ	Déphasage thermique	h
f	Facteur d'amortissement	-
τ	Temps caractéristique	h
ΔH	Variation d'enthalpie	J/Kg
μ	Viscosité dynamique	Pa.s

λ	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
α	Diffusivité thermique	m^2/s

Liste des abréviations

PCM	Phase Change Materials
MCP	Matériaux à Changement de Phase
CFD	Computational Fluid Dynamics
HVAC	Heating, Ventilation and air Conditioning
ANSYS	Analyses System
EPS	Expanded Polystyrène
HDPE	High Density Polystyrène
LHS	Latent Heat Storage
CO2	Dioxyde de carbone
PVC	Polychlorure de vinyle

Introduction générale

Introduction générale

Dans un contexte marqué par une croissance continue de la demande énergétique et par des préoccupations environnementales de plus en plus pressantes, le secteur de bâtiment constitue un levier majeur pour l'amélioration de l'efficacité énergétique. En effet, une part importante de la consommation énergétique mondiale est attribuée au chauffage et à la climatisation des bâtiments, ce qui met en évidence la nécessité de développer des solutions innovantes permettant d'assurer un confort thermique optimal tout en réduisant la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre.

Parmi les solutions passives les plus prometteuses, l'intégration des matériaux à changement de phase (PCM) dans les enveloppes des bâtiments suscite un intérêt croissant. Ces matériaux se caractérisent par leur capacité à absorber, stocker et restituer une grande quantité d'énergie thermique sous forme de chaleur latente lors des transitions de phase (solide /liquide).

Cette propriété leur permet de réguler les variations de température intérieure, de retarder les pics thermiques et d'améliorer l'inertie thermique des parois, contribuant ainsi à l'amélioration du confort thermique des occupants.

Dans ce cadre, l'optimisation thermique des murs composites intégrant des MCP apparaît comme une approche pertinente pour renforcer les performances énergétiques des bâtiments. Toutefois, la conception de tels systèmes nécessite une compréhension des phénomènes liés au changement de phase. De plus, la complexité du comportement thermo physique des MCP nécessite la précision des processus de la fusion et de solidification.

La problématique de ce travail consiste ainsi à étudier l'impact de l'intégration des matériaux à changement de phase sur le comportement thermique d'un mur composite, tout en identifiant les paramètres influençant son efficacité. Il s'agit en particulier d'analyser l'effet des propriétés thermophysiques du MCP, de son épaisseur, ainsi que l'effet de la combinaison de deux techniques passives de refroidissement.

L'objectif principal de cette étude est de développer un modèle numérique permettant de simuler le transfert de chaleur dans un mur composite intégrant un MCP, en s'appuyant notamment

Introduction générale

sur l'approche enthalpie-porosité. Cette modélisation vise à évaluer les performances thermiques du système et à quantifier l'amélioration du confort thermique apportée par l'utilisation des MCP. Elle a également pour finalité de proposer des configurations optimales d'intégration adaptées au condition climatique.

Le présent mémoire est structuré comme suit :

Chapitre I : Généralités sur les transferts thermique et les matériaux à changement de phase.

Ce chapitre présente les différents modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) ainsi que les notions fondamentales relatives aux matériaux à changement de phase, leurs propriétés, leurs classifications et leurs domaines d'application dans le bâtiment

Chapitre II : Intégration des MCP dans les bâtiments et murs composites

Ce chapitre est consacré aux différentes techniques d'intégration des MCP dans les enveloppes des bâtiments, en mettant l'accent sur les murs composites. Il aborde également les avantages, les limites et les paramètres influençant les performances thermiques de ces systèmes.

Chapitre III : Modélisation numérique et méthodologie de simulation

Ce chapitre décrit la démarche de modélisation adoptée, notamment le modèle enthalpie-porosité utilisé pour simuler le changement de phase. Il présente également la géométrie étudiée, le maillage, les hypothèses simplificatrices, ainsi que les conditions aux limites et les paramètres de simulation sous logiciel (FLUENT ou autre).

Chapitre IV : Résultats et discussion

Ce chapitre expose les résultats obtenus à partir des simulations numériques, suivie d'une analyse détaillée de l'influence des différents paramètres (propriétés du MCP, position dans le mur, condition climatique). Il met en évidence les apports des MCP en termes de confort thermique et d'efficacité énergétique.

CHAPITRE I

***« Contexte énergétique et
performance thermique des
bâtiments »***

Introduction

Face aux enjeux environnementaux actuels et à la consommation énergétique croissante du secteur du bâtiment, l'optimisation thermique de l'enveloppe est devenue une priorité pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Ce chapitre présente les concepts fondamentaux de la performance thermique, en examinant les modes de transfert de chaleur et les caractéristiques des matériaux. Nous explorerons également les différentes techniques d'amélioration, qu'elles soient actives ou passives, ainsi que les solutions de stockage de l'énergie thermique pour une utilisation rationnelle des ressources.

I.1 Contexte énergétique et environnemental

I.1.1 Consommation énergétique mondiale

Aujourd'hui, la demande mondiale en énergie ne cesse de croître. Globalement, la consommation totale augmente avec le niveau d'industrialisation et la croissance démographique qui a atteint 7 milliards au début du 21ème siècle. Les différentes sources d'énergies primaires utilisées sont les énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon), le nucléaire, la biomasse et les déchets, l'hydroélectricité et autres (géothermie, éolienne, solaire) [1] [2].

Les combustibles fossiles sont les principales sources qui peuvent couvrir la demande mondiale d'énergie, ils représentent la plus grande partie de la consommation mondiale d'énergie primaire. Selon le « Statistical Review of World Energy 2022 » publié par le groupe BP en 28 juin 2022 [3], les énergies fossiles ont encore comptées pour plus de 82 % de la consommation d'énergie primaire et plus de 61% de la production d'électricité dans le monde en 2021. Le charbon a en particulier compté à lui seul pour 36 % du mix électrique mondial dans la même année contre 35% en 2020. En valeur absolue, la consommation d'énergies fossiles est restée « globalement inchangée » entre 2019 et 2021.

L'évolution de la consommation mondiale d'énergie continue de suivre une tendance haussière. En 2021, la consommation mondiale d'énergie primaire s'est élevée à 595,15 exajoules : elle a augmenté de 5,8 % par rapport à 2020 et a retrouvé un niveau supérieur à la consommation préCovid-19 (+ 1,3% par rapport à 2019). Cette hausse de la demande a été tirée par les économies émergentes précises la même source. La Figure I.1 montre l'accroissement important de la consommation mondiale d'énergie primaire selon le rapport de BP de 2022 [3].

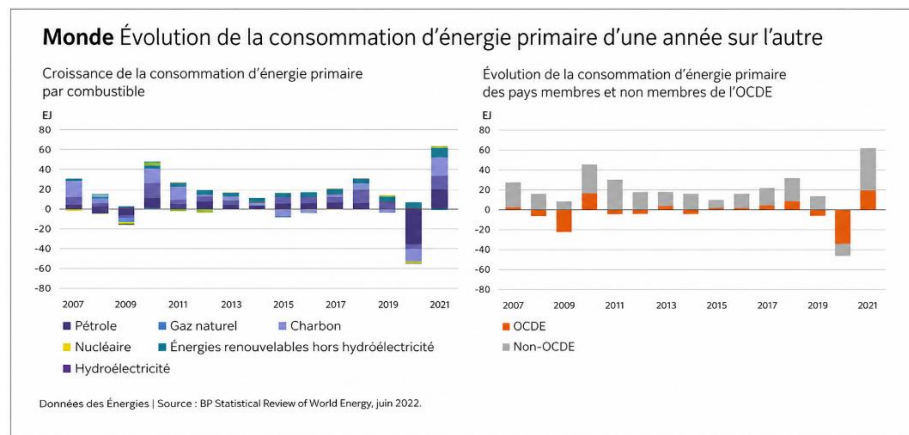


Figure I.1: Evolution de la consommation mondiale de l'énergie primaire [3].

I.1.2 Impact environnemental (émissions de CO₂, réchauffement climatique)

Le lien entre le CO₂ et le réchauffement climatique a attiré l'attention des scientifiques et des politiciens, ainsi que du grand public, via le bien connu « effet de serre » représenté dans la Figure I.2. Le rayonnement solaire passe en grande partie sans entrave dans l'atmosphère, chauffant la surface de la Terre. À son tour, l'énergie est réémise sous forme d'infrarouge, dont une grande partie est absorbée par le CO₂ et la vapeur d'eau dans l'atmosphère, qui agit ainsi comme une couverture entourant la Terre. Sans cet effet de serre naturel, la température moyenne de la surface chuterait à environ -21°C [4], moins que la température moyenne agréable de 14°C que l'on connaît aujourd'hui. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère augmente avec l'utilisation développée des combustibles fossiles, ce qui augmente l'effet de serre naturel et réchauffe la planète.

Lors de la Conférence des Nations Unies sur le changement climatique qui s'est tenue à Paris en 2015, 195 pays se sont mis d'accord sur un plan de réduction des émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre, visant à limiter l'augmentation de la température mondiale à bien en dessous de 2°C (climat préindustriel relatif, signifiant un réchauffement prédit de moins de 1,4°C car la température avait déjà augmenté de 0,6°C à la fin du XXe siècle).

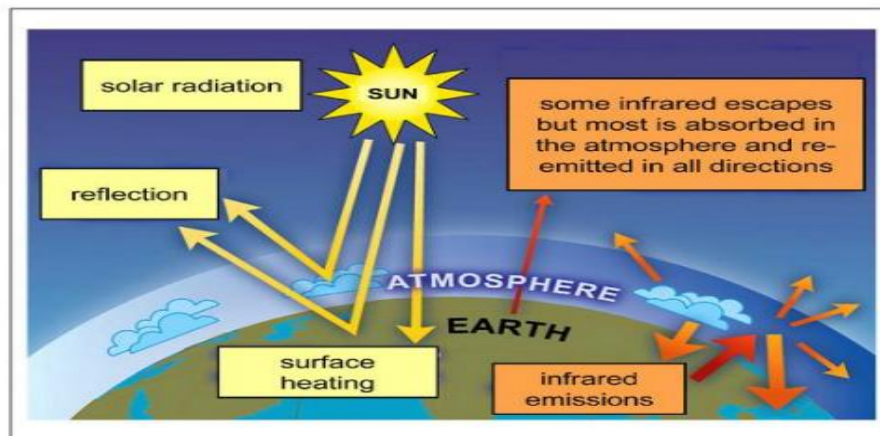


Figure I.2 : L'effet de serre [4].

L'équilibre radiatif entre le rayonnement solaire entrant (flèches jaunes) et l'absorption du rayonnement infrarouge réémis par l'atmosphère (flèches orange) entraîne le réchauffement de la surface. [5]

Le protocole de Kyoto régleme les émissions de CO_2 , de méthane (CH_4), d'oxyde nitreux (N_2O), d'hexafluorure de soufre et d'halo-carbures, qui s'appellent les gaz à effet de serre, avec l'équivalence en CO_2 en fonction de leurs rapports de forçage radiatif intégré dans le temps à celui du CO_2 , suite à une émission d'impulsions sur une période de 100 ans. Les rapports utilisés dans le protocole de Kyoto et indiqués dans les évaluations du GIEC [6] supposent que le CO_2 restant dans l'atmosphère, suite à une émission d'impulsions, décroît de façon exponentielle.

Le réchauffement climatique mondial connaît une accélération marquée, passant d'une hausse de $0,74^\circ\text{C}$ sur le siècle dernier (1906-2005) à une progression attendue de $0,2^\circ\text{C}$ par décennie pour les vingt prochaines années. Bien que les experts utilisent des modèles de simulation sophistiqués (RCP et SSP) pour anticiper l'impact des émissions, les politiques actuelles nous placent sur une trajectoire alarmante de 3°C d'ici 2100. Ce constat souligne l'écart critique entre les engagements actuels et l'objectif de $1,5^\circ\text{C}$ nécessaire pour limiter les bouleversements majeurs du système climatique, rendant impérative l'adoption immédiate de mesures de réduction d'émissions beaucoup plus strictes que celles observées au XXe siècle [7].

I.1.3 Contribution du secteur du bâtiment

Le Grenelle de l'Environnement a toujours insisté sur la nécessité urgente de s'attaquer au secteur de la construction, qui représente 40% de la demande finale en énergie au niveau national, contre 46% en Europe¹⁴ et 19% des émissions de CO₂ dans l'atmosphère, contre 25% auparavant. % autre part.

Indépendamment des chiffres fournis par les différentes organisations, il est certain que ce secteur représente un potentiel énorme pour l'efficacité énergétique et la réduction des gaz à effet de serre, il est bon de savoir que pendant la durée de vie d'un bâtiment, l'énergie produit entre 70 et 80 % des impacts environnementaux [8] .



Figure I.3 : Consommation mondiale d'énergie finale par secteur.

I.2 Enveloppe du bâtiment et échanges thermiques

I.2.1 Définition de l'enveloppe du bâtiment

L'enveloppe du bâtiment, également appelée "mur-rideau", est un élément crucial pour améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment. Elle assure une protection contre les conditions extérieures telles que la pluie, le vent et le froid, tout en permettant la circulation de l'air et de la vapeur d'eau pour prévenir les problèmes de moisissures et de qualité de l'air intérieur [9]. Il existe plusieurs types d'enveloppes de bâtiments, chacun ayant ses avantages et inconvénients en termes d'efficacité énergétique. Les murs en béton épais offrent une bonne isolation thermique mais peuvent être coûteux à construire, tandis que les murs en bois sont plus légers et moins chers, mais nécessitent une isolation supplémentaire. Les fenêtres sont également importantes pour l'efficacité énergétique et les fenêtres à double vitrage sont couramment utilisées pour réduire les pertes de chaleur [11].

Chapitre I : Contexte énergétique et performance thermique des bâtiments

D'autres options pour améliorer l'efficacité énergétique incluent l'utilisation de matériaux isolants tels que la laine de verre, la mousse de polyuréthane et le polystyrène expansé, ainsi que les systèmes de récupération de chaleur pour récupérer la chaleur de l'air sortant et l'utiliser pour chauffer l'air entrant. En somme, l'enveloppe du bâtiment joue un rôle essentiel dans la réduction des coûts énergétiques, l'amélioration de la qualité de l'air intérieur et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il est donc important de choisir des options efficaces et adaptées pour optimiser l'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment [11].

I.1.2 Rôle des murs, toitures et façades

L'enveloppe du bâtiment (murs, toiture, et façades ...) joue un rôle important dans le maintien ou l'amélioration du confort thermique car elle sépare l'intérieur du bâtiment de son environnement extérieur. Elle doit remplir sa fonction structurale et répondre aux sollicitations thermiques et environnementales. Différents paramètres contribuent de manière assez nette à l'atteinte de cet objectif comme la conception ou le choix des matériaux constituant de l'enveloppe [12]. Le choix des matériaux en fonction de leurs caractéristiques thermiques (isolation et inertie thermique) est un élément important pour optimiser le fonctionnement de l'enveloppe [12].

I.2.3 Échanges thermiques entre intérieur et extérieur

Le transfert de chaleur à travers les parois murales est un phénomène très important dans le domaine de bâtiment, ce transfert identifie les pertes thermiques à travers ces murs en hiver et les apports en été en quantifiant les besoins en chauffage ou climatisation [13].

I.2.4 Importance de la conception thermique

Le confort thermique est un concept important dans la conception de bâtiments, car il a un impact sur le bien-être et la productivité des occupants. Le confort thermique est défini comme la sensation de chaleur ou de fraîcheur ressentie par les occupants d'un bâtiment, et est influencé par de nombreux facteurs tels que la température de l'air, la vitesse de l'air, l'humidité relative et le rayonnement thermique [14].

I.3 Modes de transfert de chaleur

La chaleur est une forme d'énergie qui circule entre les corps et qui est maintenue sous des interactions thermiques. Lorsqu'une différence de température se produit entre deux corps ou un corps avec son environnement, un transfert de chaleur se produit. La chaleur se déplace naturellement par l'un des trois moyens. Les processus sont connus sous le nom de conduction, convection et rayonnement.

I.3.1 Conduction

La conduction est une méthode de transfert de chaleur due à la différence de température entre deux surfaces. La conduction se produit sans transfert de matière et elle est irréversible. Elle s'effectue lorsque deux systèmes de températures différentes sont en contact direct ou indirect (à travers une paroi qui les sépare), c'est un transfert lent. Exemple : propagation de la chaleur dans une paroi entre un intérieur de bâtiment chauffé et l'extérieur [15].

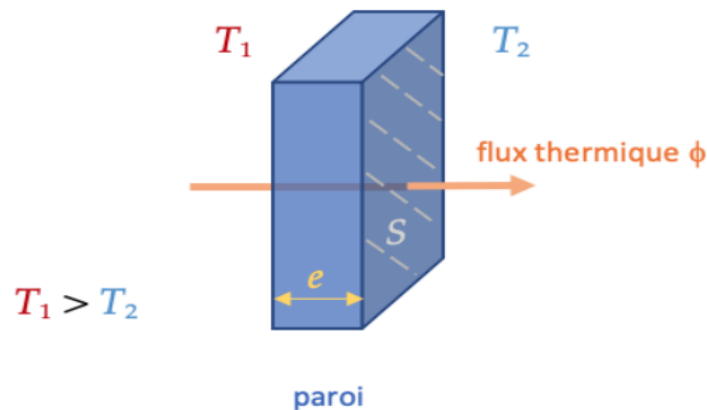


Figure I.4 : *Le principe de la conduction thermique [16].*

I.3.2 Convection

C'est un transfert de chaleur dans la matière avec mouvement macroscopique de la matière. Ce type de transfert n'intervient que pour les liquides et les gaz (C'est le fluide en mouvement qui transporte de la chaleur). On distingue deux types de convection :

- **La convection forcée** : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, un ventilateur, ...) Exemple : refroidissement d'un bâtiment sous l'effet du vent [17].
- **La convection naturelle** : le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par les variations de température au sein du fluide. C'est un mode de transfert rapide en général. Exemple : mouvement de la vapeur au-dessus d'une tasse de café, principe du convecteur [17].

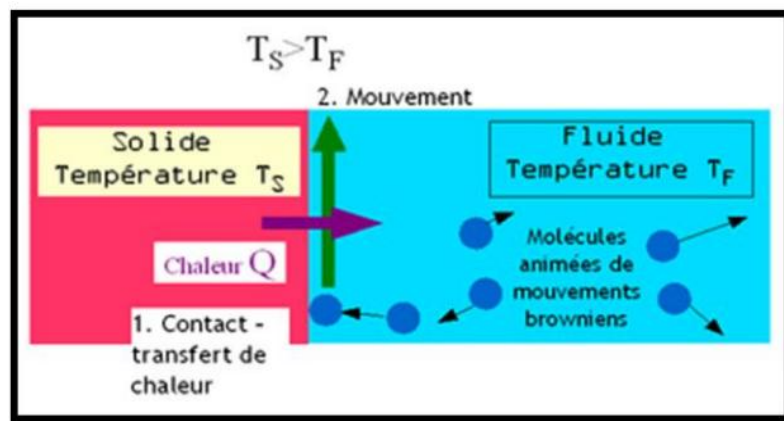


Figure 1.5 : Convection thermique dans un fluide [16].

I.3.1 Rayonnement

Echange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent ou semi transparent. Les matériaux ont la propriété d'absorber ou d'émettre des photons (ou des quantités d'énergie). L'énergie emportée par le photon est prélevée sur l'état d'énergie du corps et réciproquement l'énergie d'un photon absorbé est souvent transformée en chaleur. Cette propriété d'émission dépend donc de la température du milieu Figure I.6. Il s'agit d'un transfert à distance quasi-instantané sans nécessité de support matériel. Exemple : réchauffement d'un mur par le rayonnement solaire le jour, et chaleur émise par le mur la nuit [17].

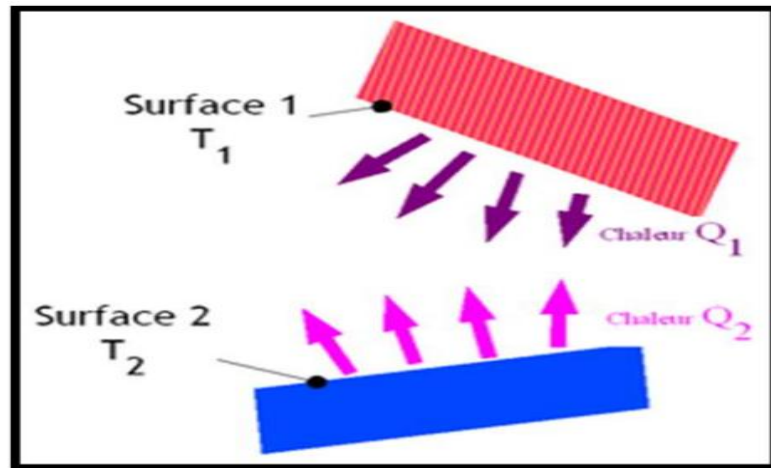


Figure I.6 : Le rayonnement thermique entre deux surfaces portées à des températures T_1 et T_2 .

1.4. Paramètres de performance thermique

1.4.1 Inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité d'un matériau à stocker l'énergie, traduite par sa capacité thermique. Plus l'inertie est élevée et plus le matériau restitue des quantités importantes de chaleur (ou de fraîcheur). Elle est utilisée en construction pour atténuer les variations de températures extérieure, et permet de limiter un refroidissement ou une surchauffe trop importante à l'intérieur [18].

1.4.2 Le déphasage thermique (time lag)

Appelé également décalage temporel (noté φ), représente le temps de réponse entre un pic de chaleur extérieur et celui engendré à l'intérieur pour une paroi donnée. Il est donné en heures[19] comme suit :

$$\varphi = \tau_{n,\max} - \tau_{i,\max} \quad (\text{I.1})$$

Où φ est le temps de retard de la température de pointe, $\tau_{n,\max}$ est le moment de la température maximale intérieure pour le mur intégré au MCP, $\tau_{i,\max}$ est le moment de pointe pour le mur traditionnel sans MCP.

Cette grandeur caractérise la capacité d'un matériau à retarder les variations de température. Plus le déphasage est élevé, meilleur est le confort thermique car les variations de la température extérieure se ressentent beaucoup moins rapidement à l'intérieur.

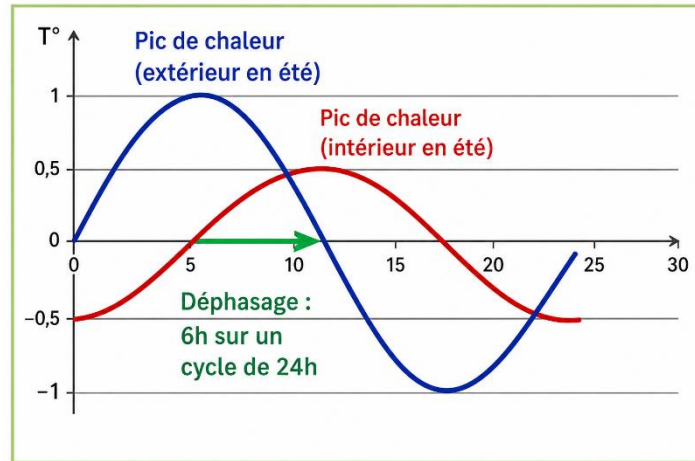


Figure I.7 :Le déphasage thermique [19].

1.4.3 Facteur d'amortissement (decrement factor)

L'amortissement (noté f) est la relation entre la fluctuation maximale de la température intérieure et extérieure. Plus la valeur est élevée, meilleur est le confort thermique. Car les variations de la température extérieure se ressentent moins à l'intérieur [20].

Son expression se calcule suivant la relation [21]:

$$f = \frac{T_{i,\max} - T_{i,\min}}{T_{n,\max} - T_{n,\min}} \quad (I.2)$$

Où f est le facteur d'amortissement, $T_{i,\max}$ et $T_{i,\min}$ sont les températures intérieures maximales et minimales du mur avec MCP ($^\circ\text{C}$), $T_{n,\max}$ et $T_{n,\min}$ sont les températures intérieures maximales et minimales du mur traditionnel sans MCP ($^\circ\text{C}$).

Selon [22], l'amortissement rapporte l'amplitude de l'oscillation de température externe cyclique agissant sur le mur au flux de chaleur périodique libéré dans l'air intérieur.

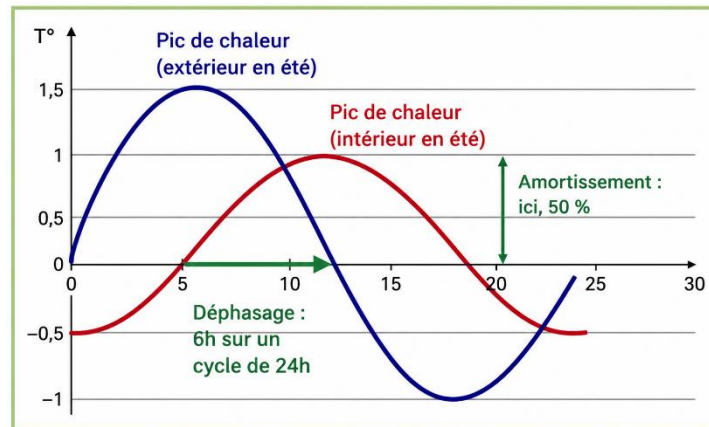


Figure I.8 : L'amortissement [19].

1.4.4 Confort thermique

Le confort thermique est la sensation d'équilibre et de contentement exprimé par l'individu envers les conditions thermiques. [23] le définit : "Thermal Comfort is that condition of mind that expresses satisfaction with the thermal environment". Selon la norme [24], l'homme perçoit et interprète son état thermique en fonction de ses préférences individuelles. Il porte un jugement qui peut être, perceptif, évaluatif ou préférentiel. Donc le confort thermique ne se résume pas à des paramètres physiques, mais il fait aussi intervenir des données subjectives.

Le confort thermique est le résultat d'un enchaînement successif de plusieurs phénomènes qui relèvent de différentes disciplines. En génie climatique, il s'agit de déterminer les effets du climat extérieur sur le bâtiment pour le dimensionnement des équipements. Les experts en thermique réalisent des recherches approfondies pour comprendre les gradients de température et l'indice de confort. Tandis qu'en thermophysiology, on étudie d'avantage les effets de l'environnement thermique intérieur sur le corps humain pour le calcul des grandeurs thermophysiological. En fin en psycho-sociologie, on s'intéresse à l'évaluation du climat intérieur par l'être humain grâce à l'interprétation en termes d'acclimatation qui est la composante subjective [25].

1.5. Techniques actives de régulation thermique

Les techniques passives de régulation thermique regroupent l'ensemble des solutions permettant d'améliorer le confort thermique des bâtiments sans recourir à des systèmes mécaniques ou à une consommation énergétique active. Elles reposent principalement sur une

conception architecturale adaptée, l'utilisation de matériaux appropriés et l'exploitation des conditions climatiques locales [26].

- **La vibration des surfaces** : C'est une méthode utilisée principalement soit à basse ou haute fréquence pour améliorer le transfert de chaleur monophasé. Un piézoélectrique disposé peut être utilisé pour faire vibrer une surface et projeter de petites gouttelettes sur une surface chauffée pour promouvoir le « refroidissement par pulvérisation ».
- **La vibration des fluides** : C'est une technique plus pratique d'amélioration des vibrations en raison de la masse de la plupart des échangeurs de chaleur. Les vibrations vont des pulsations d'environ 1 Hz aux ultrasons. Les fluides monophasiques sont une préoccupation majeure.
- **Champs électrostatiques** : Ils sont appliqués dans les systèmes d'échange impliquant des fluides diélectriques. D'une manière générale, les champs électrostatiques peuvent être dirigés pour provoquer un mélange plus important de fluide au voisinage de la surface de transfert de chaleur.
- **L'injection** : Il est utilisé en fournissant du gaz à travers une surface poreuse de transfert de chaleur à un écoulement de liquide ou en injectant le même liquide en amont de la section de transfert de chaleur. Le gaz injecté augmente le flux monophasique. Le dégazage de surface des liquides peut produire des effets similaires.
- **Impact de jet** : Il force un fluide monophasique normalement ou obliquement vers la surface. Des jets simples ou multiples peuvent être utilisés, selon leur direction d'injection, dans les écoulements à une seule phase ou dans les applications d'ébullition [26].

1.6. Techniques passives d'amélioration thermique

Comme l'ensemble des techniques qui permettent de réduire le surchauffement d'un espace à travers le contrôle thermique et des méthodes naturelles de rafraîchissement. Les stratégies passives de refroidissement sont : la protection solaire, ventilation ; l'inertie thermique, l'évaporation et isolation thermique [26].

1.6.1 Isolation thermique

L'isolation thermique efficace est essentielle pour minimiser les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été. L'utilisation de matériaux d'isolation de haute qualité pour les murs, le toit et les planchers est une pratique courante [11].

1.6.2 Ventilation naturelle

Une ventilation adéquate est essentielle pour évacuer la chaleur excessive et maintenir un environnement frais en été. La disposition architecturale doit permettre une circulation d'air naturelle grâce à des ouvertures stratégiques et à une conception bien pensée [11].

1.6.3 Protection solaire

L'intégration de dispositifs de protection solaire, tels que des auvents, des stores ou des volets, peut aider à bloquer le soleil direct en été tout en laissant entrer la lumière naturelle en hiver. Cette approche contribue à maintenir une température intérieure confortable tout au long de l'année[11].

1.6.4. Stockage thermique

Le stockage constitue un élément fondamental de tout système solaire, étant donné que les apports énergétiques et les besoins ne coïncident généralement pas dans le temps. Cette situation est particulièrement marquée dans les systèmes de chauffage. À l'échelle d'une journée, on observe que la demande en chauffage augmente durant la nuit, tandis que les apports solaires sont disponibles uniquement pendant la journée (voir figure II.9). L'objectif du stockage est donc de capter l'excédent d'énergie produit pendant la période d'apport (+) afin de le restituer durant la période de déficit (-)[27].

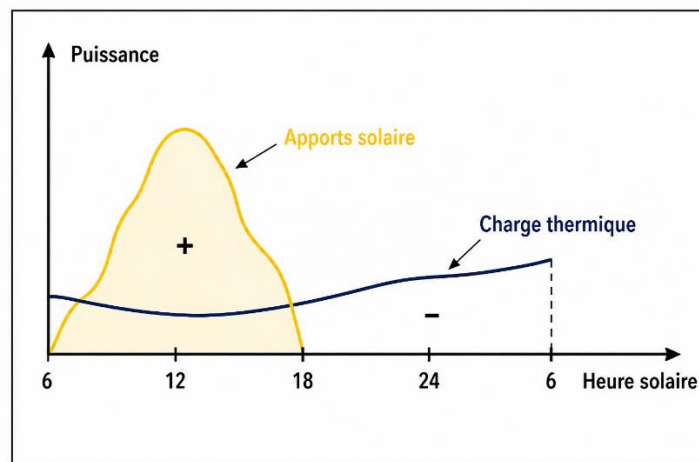


Figure I.9: Apport et besoins sur une journée [28].

1.6.4.1 Types de stockage thermique

On distingue trois types de stockage de l'énergie thermique :

- **Stockage par chaleur sensible :** Le stockage par chaleur sensible s'effectue par variation de la température d'un matériau solide ou liquide sans changement de phase. L'énergie stockée dépend de la masse et de la chaleur spécifique du matériau, ainsi que l'écart entre

Chapitre I : Contexte énergétique et performance thermique des bâtiments

sa température initiale et finale. Suite à une variation de température $T_2 - T_1$, la chaleur stockée [J] est exprimée par :

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad \text{I.3}$$

Où, C_p est la chaleur spécifique [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] et m [kg] la masse du matériau.

Certes, ce mode de stockage est le plus ancien et le plus facile à évaluer, cependant, il peut présenter un certain nombre d'inconvénients, notamment la gamme de températures de fonctionnement pouvant être limitée, les pertes thermiques de stockage et la nécessité de systèmes volumineux étant donné que la quantité d'énergie stockée est directement proportionnelle au volume du système [29].

- **Stockage par chaleur latente :**

La deuxième technique concerne le stockage par chaleur latente. Cette technique utilise l'énergie emmagasinée ou restituée lorsqu'un corps change d'état à température constante. Le matériau utilisé peut exister sous différents états (solide, liquide et gazeux). Les transitions déphasent possibles sont gaz/liquide, gaz/solide, solide/solide et solide/liquide.

Le changement solide/liquide est le plus couramment utilisé en raison de la faible variation volumique (<10%) lors de la fusion du matériau, associée à des chaleurs latentes élevées et ceci, contrairement, au changement de phase liquide/Gas, qui induit de grandes variations de volume.

La figure I.10 ci-après montre la relation entre la température et l'enthalpie lors d'un changement de phase solide/liquide. La chaleur sensible et la chaleur latente interviennent successivement dans le processus thermique[29].

La chaleur stockée dans ce cas est donnée par :

$$Q = m \cdot C_{p,s} \cdot (T_f - T_1) + m \cdot L_f(T_f) + m \cdot C_{p,l} \cdot (T_2 - T_f) \quad \text{I.4}$$

Dans cette équation, le premier terme correspond à la chaleur sensible stockée à l'état solide. Le terme $L_f(T_f)$ correspond à la variation d'enthalpie lors du changement de phase [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] et, enfin, le dernier terme désigne la chaleur sensible stockée à l'état liquide.

$C_{p,l}$: la capacité thermique massique (chaleur spécifique) à l'état liquide [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

$C_{p,s}$: la capacité thermique massique (chaleur spécifique) à l'état solide [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

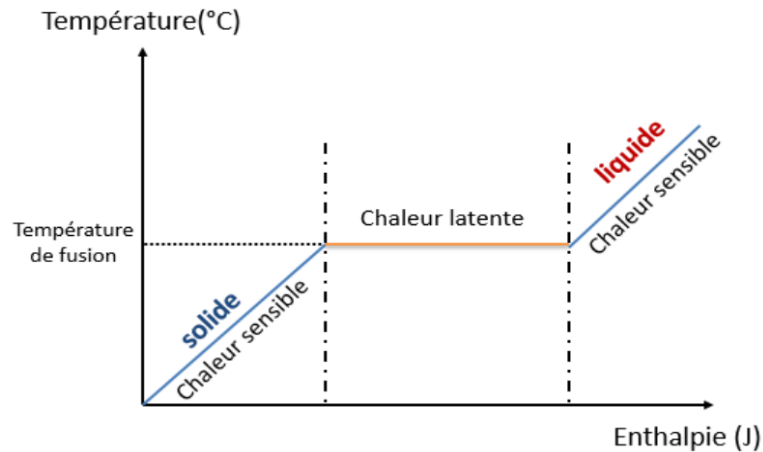


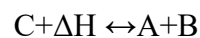
Figure I.10 : *Changement de phase solide/liquide*

L'énergie stockée par chaleur latente est beaucoup plus importante que celle du stockage par chaleur sensible. Par exemple, l'enthalpie de fusion de 1 kg de glace (passage de 1°C à 0°C) est de l'ordre de 336 kJ. Cette énergie est 80 fois plus élevée que l'énergie fournie à 1kg d'eau pour élever sa température de 1°C[29].

- **Stockage sous forme chimique**

Le stockage sous forme chimique comprend le procédé à sorption : (absorption-adsorption), et chimique. Le stockage chimique s'opère grâce à une réaction chimique réversible. Le stockage survient lors de la décomposition endothermique d'un élément C (phase de charge).

L'énergie stockée est restituée suite à une réaction exothermique des produits de la décomposition A et B,



I.5

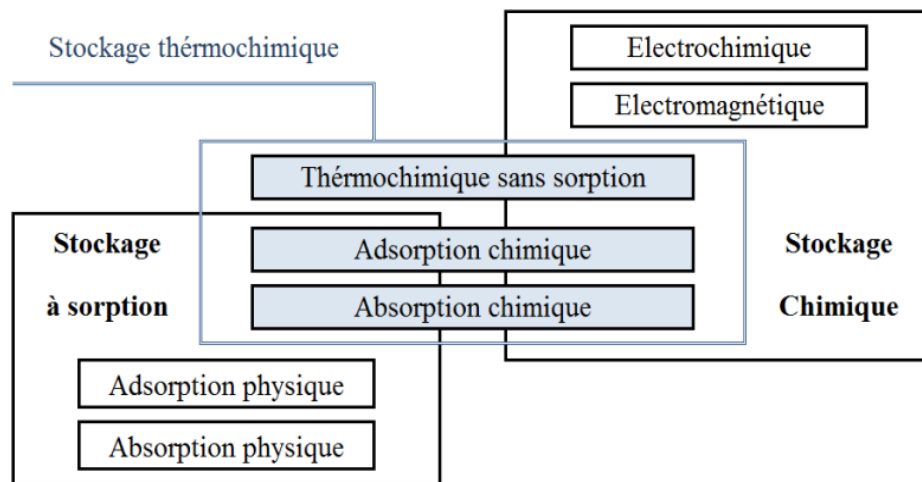


Figure I.11 : Classification des systèmes de stockage par sorption et par réaction chimique [30].

La sorption comprend l'adsorption qui est un phénomène d'interaction de surface entre un solide et un gaz, par lequel des atomes ou des molécules de gaz ou de liquides (adsorbats) se fixent sur une surface solide (adsorbant). L'absorption représente un phénomène d'interaction en volume, dans lequel un gaz ou un liquide passe en solution dans un autre liquide. Le procédé inverse est la désorption. Les deux types de sorption peuvent être utilisés pour stocker de l'énergie

I.6.4.2 Rôle de stockage thermique

L'étude du stockage de l'énergie thermique joue un rôle essentiel dans l'utilisation rationnelle de l'énergie, notamment dans le secteur du bâtiment où les besoins énergétiques varient en fonction des conditions climatiques et de cycles jour/nuit. Elle repose principalement sur les processus de stockage et de déstockage de la chaleur, permettant d'assurer une meilleure adéquation entre l'offre énergétique et la demande thermique [32].

Le principe consiste à accumuler l'énergie thermique excédentaire pendant la période de forte disponibilité, puis à la restituer ultérieurement lorsque les besoins augmentent. Dans le bâtiment, cette approche contribue à améliorer l'inertie thermique, à stabiliser la température intérieure et à réduire le recours aux systèmes actifs de chauffage et de climatisation.

Dans ce contexte, l'utilisation des matériaux à changements de phase s'impose comme une solution particulièrement performante. Ces matériaux ont la capacité de stocker et de

libérer une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur latentes lors de leur transition de phase (solide/liquide), à température quasi constante. Intégrés de manière passive dans l'enveloppe du bâtiment (murs, plafonds, planchers), les MCP permettent d'absorber les excès de chaleur durant la journée et de les restituer lorsque la température diminue, notamment pendant la nuit.

Ainsi, le recours aux MCP dans le stockage thermique constitue une stratégie innovante pour optimiser la gestion énergétique des bâtiments, améliorer thermique des occupants et réduire significativement la consommation énergétique globale, s'inscrivant[31].

1.7 Problématique du mémoire

Face à l'augmentation continue de la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment, notamment liée aux besoins en chauffage et en climatisation, l'amélioration du confort thermique tout en réduisant la demande énergétique constitue un enjeu majeur. Les solutions d'isolation classiques, bien qu'efficaces pour limiter les pertes thermiques, restent insuffisantes pour gérer les variations dynamiques de température, en particulier dans les climats caractérisés par de fortes amplitudes journalières.

Dans ce contexte, l'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans les murs composites apparaît comme une solution innovante permettant de stocker et de restituer l'énergie thermique sous forme de chaleur latente. Toutefois, l'efficacité de cette solution dépend de plusieurs facteurs interdépendants, notamment les propriétés thermo physiques du MCP et son épaisseur.

Ainsi, la question centrale de ce mémoire peut être formulée comme suit : comment concevoir et optimiser un mur composite intégrant un matériau à changement de phase afin d'améliorer le confort thermique des bâtiments tout en minimisant la consommation énergétique ?

1.8 Objectifs du travail

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier et d'optimiser le comportement thermique d'un mur composite intégrant un matériau à changement de phase, à travers une approche de modélisation numérique.

Pour atteindre cet objectif principal, plusieurs objectifs spécifiques sont définis :

- Étudier les mécanismes de transfert de chaleur dans un mur composite avec MCP.

Chapitre I : Contexte énergétique et performance thermique des bâtiments

- Analyser le comportement thermique du matériau à changement de phase lors des cycles de fusion et de solidification.
- Développer un modèle numérique basé sur l'approche enthalpie-porosité pour simuler le transfert thermique.
- Évaluer l'influence des paramètres clés tels que :
 - Les propriétés thermophysiques du MCP,
 - Son épaisseur,
 - La combinaison de deux techniques passives de refroidissement.
- Quantifier l'amélioration du confort thermique intérieur grâce à l'intégration des MCP.
- Proposer des configurations optimales pour l'intégration des MCP dans les murs des bâtiments.

CHAPITRE II

***« Matériaux à Changement de
Phase dans les Bâtiments »***

Introduction

De grandes quantités d'énergie peuvent être stockées et libérées à l'aide d'un système de stockage d'énergie thermique à base de matériaux à changement de phase (PCM). Ce système repose sur la capacité du matériau à absorber ou libérer de la chaleur lors d'un changement d'état, comme la fusion, la solidification ou l'évaporation. Lors de la transition d'un état solide à un état liquide, par exemple, le matériau absorbe de la chaleur ; inversement, il en libère en repassant à l'état solide. Ainsi, les PCM permettent un stockage et une restitution d'énergie thermique de manière prévisible, en fonction de la quantité d'énergie associée à leur transition de phase [32]

II.1 Stockage thermique par matériaux à changement de phase

II.1.1 Définitions et principes fondamentaux

II.1.1.1 Définition des matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase (Phase Change Materials - PCM) sont des substances capables de changer d'état physique (solide $\leftrightarrow$ liquide) sous l'effet des variations de température [33]. Lorsqu'ils absorbent de la chaleur, ils passent de l'état solide à l'état liquide, stockant ainsi l'énergie thermique sous forme de chaleur latente. Inversement, lorsqu'ils libèrent cette énergie, ils repassent à l'état solide, restituant la chaleur stockée. Ces matériaux sont largement utilisés pour le stockage thermique, notamment afin d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et des systèmes solaires.

II.1.1.2 Principe de fonctionnement des Matériaux à Changement de Phase

Les matériaux à changement de phase possèdent des propriétés thermo-physiques particulières leur permettant d'absorber ou de restituer une grande quantité d'énergie thermique lors de leur transition entre l'état solide et l'état liquide. Cette transition s'effectue à température Quasi-constante, ce qui constitue un atout majeur pour les applications de stockage thermique. Ainsi, lorsqu'un MCP solide est exposé à une température supérieure à son point de fusion, il fond en absorbant une quantité significative de chaleur, stockée sous forme de chaleur latente, jusqu'à ce que la transition soit complète. Inversement, lorsque le PCM liquide est soumis à une température inférieure à son point de solidification, il cristallise en libérant l'énergie thermique emmagasinée lors de la fusion. Ce cycle réversible d'absorption et de restitution d'énergie thermique permet aux PCM de contribuer efficacement à la régulation thermique dans divers systèmes fonctionnant à température constante [34].

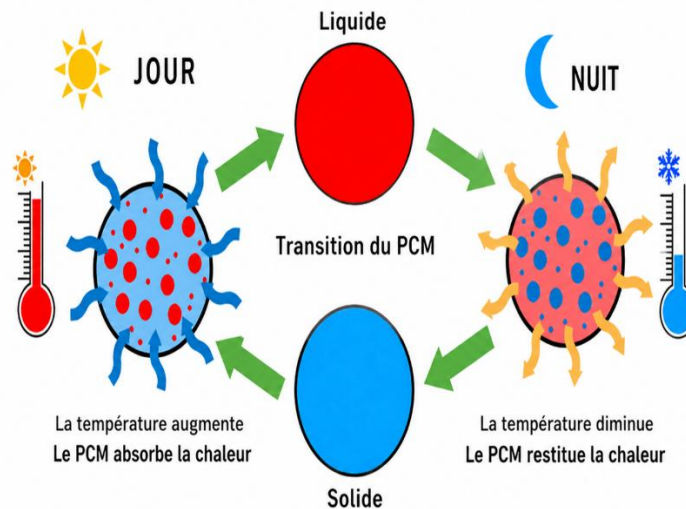


Figure II.1 : Principe de fonctionnement des Matériaux à Changement de Phase [34].

II.1.2 Types de matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase sont généralement classés en trois catégories : Organiques, inorganiques et eutectiques.

II.1.2.1 MCP organiques :

Les PCM organiques sont généralement dérivés de la paraffine ou d'autres matériaux issus du pétrole, des plantes ou des animaux [35]. Un exemple bien connu est la cire de paraffine.

- **Les paraffines**

Les principaux constituants des paraffines sont des hydrocarbures saturés à chaînes linéaires ou ramifiées, parfois associés à des groupements méthyles substitués à l'extrémité des chaînes. Les paraffines ainsi constituées sont relativement pures, et leurs points de fusion peuvent être utilisés comme identifiants. Il s'agit cependant d'une plage de fusion plutôt que d'un point unique, car les paraffines sont souvent présentes sous forme de mélanges. Les n-paraffines, qui possèdent les meilleures propriétés thermiques, sont les plus couramment utilisées pour les applications de stockage thermique. Les paraffines intéressantes sont celles qui cristallisent à des températures adaptées aux besoins de stockage, appelées "cires paraffiniques". Plus le nombre d'atomes de carbone augmente, plus le point de fusion des alcanes s'élève. Bien que les paraffines offrent des avantages tels qu'une fusion congruente et une bonne capacité de nucléation, elles présentent également des inconvénients : elles sont modérément inflammables, peu compatibles avec certains plastiques, et possèdent une faible conductivité thermique [36].

II.1.2.2 MCP inorganiques :

Cette catégorie regroupe des matériaux tels que les hydrates de sel et certains alliages métalliques. Ils présentent une conductivité thermique élevée et une forte capacité de stockage de chaleur latente, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications de gestion thermique [35].

II.1.2.3 MCP eutectiques :

Les PCM eutectiques sont constitués de mélanges de composants sélectionnés avec précision pour obtenir une température de fusion optimisée, idéale pour le stockage et la restitution de l'énergie thermique [35].

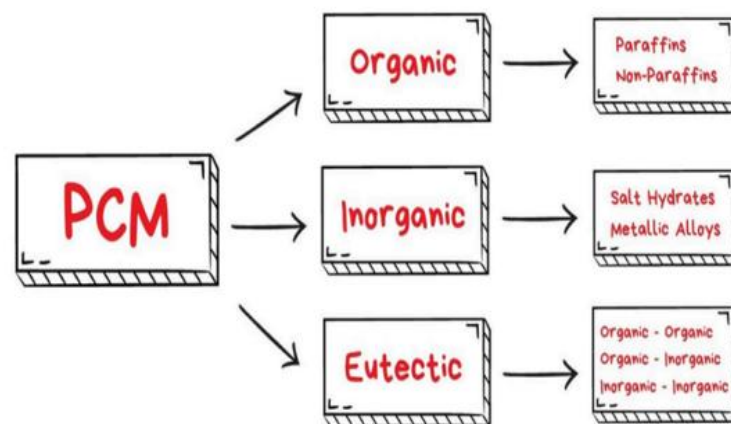


Figure II.2: Types de Matériaux à Changement de Phase [37]

II.2 Propriétés des MCP

Les matériaux à changement de phase sont utilisés pour stocker la chaleur grâce à la chaleur latente. Lorsque la température ambiante atteint leur point de fusion, ces matériaux se liquéfient et absorbent l'énergie par chaleur latente. Une fois que la température baisse, les MCP se cristallisent, libérant leur énergie stockée. Ainsi, leur utilisation améliore le confort thermique des bâtiments en réduisant la consommation de chaleur en hiver et les besoins en climatisation en été.

Plusieurs travaux de recherches, se sont intéressés à l'étude de ces matériaux ainsi que leur stabilité dans la matrice cimentaire et en particulier l'effet d'incorporation des MCP sur les propriétés thermiques et mécaniques du béton-MCP [38] [39] [40] .

Chapitre II : Matériaux à changement de phase dans les bâtiments

Les matériaux à changement de phase assurent le stockage de l'énergie selon la méthode LHS. Dans ce cas, un matériau à changement de phase absorbe l'énergie thermique de son environnement pour changer d'état, et dans le processus inverse, l'énergie stockée est libérée dans l'environnement. Les MCP se comportent initialement de la même manière que les autres matériaux conventionnels lorsque la température augmente, mais l'énergie est absorbée lorsque le matériau reçoit de la chaleur à des températures plus élevées et proches de la transformation de phase. Contrairement aux matériaux conventionnels, dans les MCP, l'absorption ou la libération de l'énergie thermique se fait à une température constante. Un MCP absorbe et libère normalement de l'énergie thermique 5 à 14 fois plus que d'autres matériaux de stockage tels que l'eau ou la roche [41].

II.2.1 Critères de choix de MCP

Le choix des MCP dépend principalement de l'application attendue et des besoins des utilisateurs. Il faut ainsi définir les critères qui permettent de faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée. Lors du choix du type de MCP à utiliser, la température de transition et la plage de fusion sont encore des critères importants. La plage de fusion peut être déterminée en fonction de l'application souhaitée (construction, énergie nucléaire, transport, alimentation, textile, etc.). En revanche, ces matériaux doivent présenter une chaleur latente de fusion élevée [42].

La température de fusion d'un grand nombre de matériaux à changement de phase se situe dans la plage de températures (0 ° - 120 °C). Cependant, ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsque certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques sont définies à partir d'un certain nombre de critères [43].

II.2.2 Critères thermodynamiques :

Les matériaux à changement de phase doivent avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de la température souhaitée ;
- Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur)
- Chaleur spécifique élevée, de sorte que le matériau peut avoir une chaleur sensible.
- Une fusion appropriée.
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition [44].

II.2.3 Critères Chimiques :

Le matériau à changement de phase ne devrait avoir pratiquement pas de surfusion. Le matériau fondu doit cristalliser à la température de solidification indiquée par le tableau thermodynamique [43].

II.2.4 Critères économiques :

- Le matériau à changement de phase doit être :
- Disponible en grande quantité
- Bon marché [43]

II.3 Application des matériaux à changement de phase dans les bâtiments

II.3.1 Introduction

Les matériaux à changement de phase sont largement utilisés dans le domaine du bâtiment pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort thermique intérieure[43], [45]. Grâce à leur capacité de stockage de chaleur latente, ils permettent de réduire les variations de température et les besoins en chauffage et en climatisation[38]. Les MCP peuvent être intégrés dans différents éléments de construction tels que les murs, les plafonds et les planchers afin d'optimiser les performances thermiques des bâtiments[46].

II.3.2 Applications des MCP dans les bâtiments pour le refroidissement gratuit (free cooling)

Le refroidissement gratuit est une technique de refroidissement utilisant les basses températures extérieures pour réduire l'utilisation de la climatisation mécanique[47]. Dans les bâtiments, cette méthode peut être réalisée par refroidissement à eau ou par ventilation d'air frais. Les matériaux à changement de phase sont utilisés pour stocker la fraîcheur nocturne et la restituer durant la journée afin de maintenir une température intérieure plus stable [48].

Plusieurs recherches ont montré que l'intégration des MCP dans les murs, plafonds, planchers et systèmes de ventilation améliore le confort thermique et diminue la consommation d'énergie [49]. L'efficacité du système dépend principalement des propriétés thermiques des MCP notamment leur température de fusion, ainsi que des conditions climatiques¹³. Les meilleurs résultats sont obtenus dans les régions présentant une grande différence de température entre le jour et la nuit.¹⁴

Des systèmes innovants combinant MCP, ventilation nocturne, ventilateurs et échangeurs thermique ont également été développés pour améliorer les performances énergétiques des

bâtiments^{15 16}. Cependant, le choix approprié du MCP reste essentiel pour garantir l'efficacité du refroidissement gratuit et assurer un bon confort thermique des occupants¹⁷.

II.3.3 Applications des MCP dans les bâtiments pour le déplacement des charges de pointe

Les matériaux à changement de phase permettent de stocker l'énergie thermique pendant les périodes creuses et de la restituer lors des pics de demande, contribuant ainsi au déplacement des charges électriques dans les bâtiments [50]. Leur intégration dans les éléments de construction (murs, plafonds, planchers et systèmes de ventilation) aide à réduire [51]

Les performances des MCP dépendent de leurs propriétés thermiques, de leur emplacement des conditions climatiques [52]. Bien qu'ils offrent un potentiel important pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire la taille des systèmes HVAC, la majorité des études reste basée sur des simulations ou des essais limités, nécessitant encore des validations à long terme.

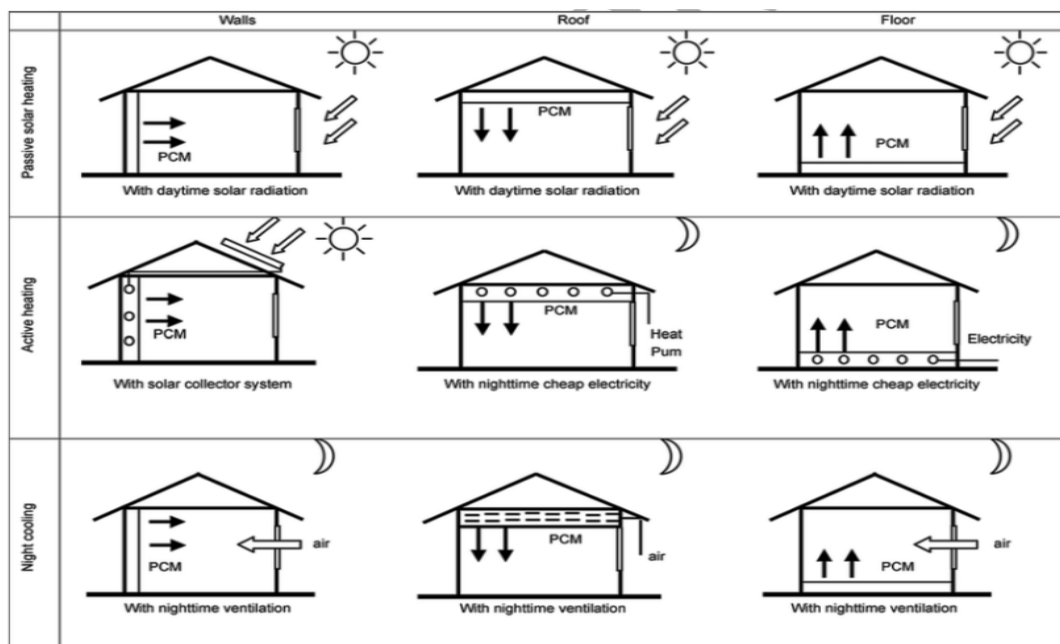


Figure II.3 : Intégration de MCP dans l'habitat [47]

II.3.4 Applications du MCP dans les bâtiments climatisés

Les matériaux à changement de phase sont largement utilisés dans les bâtiments climatisés pour le stockage et la gestion de l'énergie thermique [43]. Ils peuvent être intégrés dans des systèmes solaires, de chauffage et de climatisation afin de réduire la consommation énergétique et de déplacer les charges de pointe [45].

Les études montrent que les systèmes hybrides (solaire + MCP + électricité) permettent des économies d'énergie importantes, pouvant atteindre plus de 30% pour le chauffage et jusqu'à 80% dans certains systèmes de refroidissement [46].

Les MCP améliorent aussi l'efficacité des planchers chauffants, des plafonds actifs, des toitures et des fenêtres intelligentes.

En général, ces technologies sont efficaces sur le plan thermique et techniquement réalisables, mais leur rentabilité économique doit être soigneusement évaluée avant leur application à grande échelle.

II.3.5 Applications des MCP dans les bâtiments sans climatisation

Dans les applications passives, les matériaux à changement de phase sont intégrés dans l'enveloppe du bâtiment (murs, toits et sols) afin d'augmenter l'inertie thermique[46]. Ils permettent de stocker la chaleur solaire pendant la journée par fusion, puis de la restituer la nuit lors de la solidification[47].

Ce mécanisme contribue à limiter la surchauffe en été et à améliorer le confort thermique en hiver en fournissant une source de chaleur nocturne[53]. Ainsi, les MCP participent à la régulation naturelle de la température intérieure sans recours à la climatisation[54].

Les recherches dans ce domaine sont généralement classées en trois approches : la simulation numérique, l'expérimentation, et la combinaison des deux méthodes pour analyser les performance thermiques énergétiques des bâtiments intégrant des MCP [55].

- **Obtention du confort thermique par l'utilisation des MCP :**

Tableau II.1: Applications potentielles de stockage de l'énergie thermique par les matériaux

Méthode d'utilisation du MCP	Application	Objective	Secteur
Stockage par MCP réparti dans la cloison (plâtre, ciment, PVC, mousse, verre, nids d'abeille)	Chauffage et conditionnement d'air des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Tous
Chauffage électrique avec stockage MCP	Chauffage locaux	Consommation heures creuses et conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel
Stockage MCP dans les gaines aérauliques pour le chauffage et la climatisation	Chauffage conditionnement d'air des locaux	Consommation heures creuses conservation	Commercial institutionnel
Préchauffage d'air à MCP pour pompe à chaleur	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel
Murs rideaux	Chauffage des locaux	Conservation	Commercial, industriel et institutionnel
Chauffe-eau avec le stockage par les MCP 1	Chauffage de l'eau	Consommation heures creuses conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel

Le confort thermique peut être obtenu par des moyens passifs ou actifs. Les moyens passifs sont liés essentiellement au stockage thermique dans la structure des bâtiments. Ils sont décrits par ailleurs. Les moyens actifs concernent le transfert de l'énergie stockée par ailleurs par les MCP. Sur le tableau suivant (tableau .1) on résume les applications potentielles du stockage thermique à l'aide de MCP [56] .

Plusieurs études ont montré que l'intégration des PCM permet de réduire les pics de température intérieure de l'ordre de 3 à 4°C, en absorbant la chaleur pendant la journée et en la restituant durant la nuit. Cette capacité de stockage thermique contribue à limiter les variations de température et à améliorer la stabilité thermique des espaces intérieurs [57] .

Par ailleurs, l'utilisation des PCM permet de diminuer la consommation énergétique des bâtiments, notamment en réduisant les besoins en climatisation et en chauffage. Des économies d'énergie pouvant atteindre 15 % ont été observées selon les conditions climatiques et le type d'intégration des PCM [57] .

II.4 Technique d'intégration des MCP dans les bâtiments

Les matériaux à chargement de phase sont intégrés dans les bâtiments afin d'améliorer le stockage de l'énergie thermique et de réduire les variations de température intérieure. Grâce à leur capacité à absorber et restituer la chaleur latente, ils contribuent à l'amélioration du confort thermique et à la diminution de la consommation énergétique. Plusieurs techniques d'intégration ont été développées pour assurer leur stabilité et optimiser leurs performances dans les matériaux de construction.

II.4.1 Encapsulation de matériaux à changement de phase

L'encapsulation des matériaux à changement de phase est une étape essentielle après leur sélection pour une application dans les bâtiments[38],[43]. Elle permet de contenir le matériau et d'assurer son bon fonctionnement sur le long terme. La conception d'un système d'encapsulation doit répondre à plusieurs exigences impotentes, notamment : assurer l'étanchéité, protéger le MCP, faciliter le transfert thermique et permettre une manipulation sécurisée[47]

Comme les systèmes MCP sont généralement conçus pour durer environ 20 ans, le matériau d'encapsulation doit présenter une grande durabilité[50]. Il doit posséder des propriétés physiques spécifique telles que : une bonne résistance mécanique, une flexibilité adaptée, une stabilité thermique, une résistance aux conditions environnementales et aux rayons UV, ainsi qu'une barrière efficace contre l'humidité et l'air. Il doit également être compatible avec le MCP, ne pas réagir chimiquement avec lui, éviter toute fuite ou migration, et garantir un transfert thermique efficace[43], [45].

Enfin, il existe trois principales méthodes d'encapsulation des MCP adaptées aux applications dans le bâtiment ; la macro-encapsulation (dans des contenants comme les métaux ou plastiques), l'absorption dans une matrice solide, et la micro-encapsulation[38]. Ces différentes techniques permettent d'intégrer efficacement les MCP dans les solutions de stockage thermique.

II.4.2 Macro-encapsulation

La macro-encapsulation est actuellement la méthode de confinement des MCP la plus utilisée [47]. Elle consiste à enfermer des quantités importantes de matériau (de quelques grammes à plusieurs kilogrammes) dans des unités distinctes, conçues avec un grand rapport surface/volume afin d'optimiser le transfert thermique [47]. Dans le bâtiment, ces systèmes sont

principalement utilisés avec des transferts de chaleur par air forcé, mais aussi dans des systèmes à fluide caloporteur circulant entre les unités[45].

Cependant, cette technique présente certaines limites. Le transfert thermique diminue lors de la solidification, car le MCP se solidifie d'abord en formant une couche isolante[47]. De plus, dans le cas des hydrates de sel, des problèmes spécifiques peuvent apparaître, tels que le sous-refroidissement et la ségrégation de phase[38], [43].

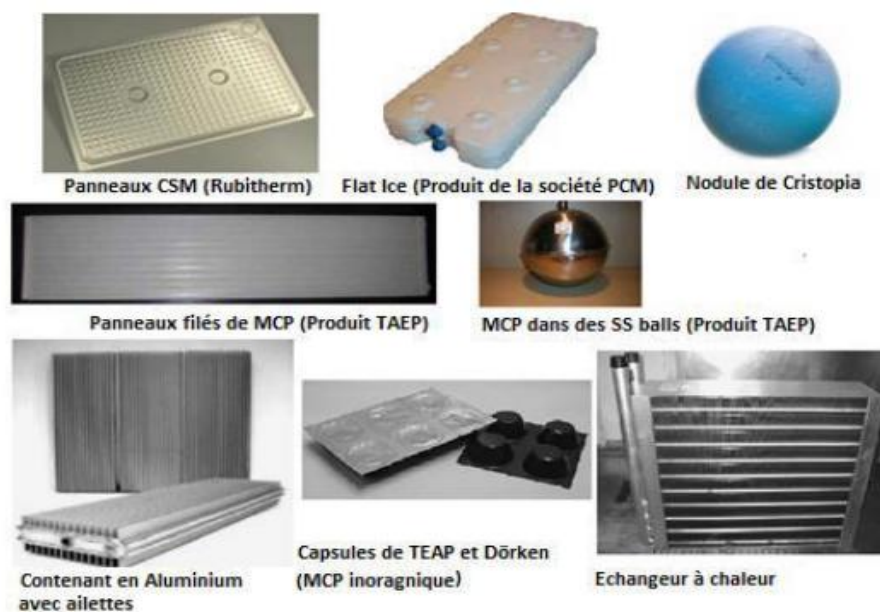


Figure II.4: Exemple de technique macro-encapsulation de MCP[58].

Cette figure présente différentes formes de macro-encapsulation des MCP, telles que des panneaux, capsules et échangeurs, conçues pour améliorer le stockage et le transfert thermique[47]. Elle met en évidence la diversité des solutions adaptées aux applications dans le bâtiment. Toutefois, ces systèmes peuvent présenter une diminution du transfert thermique lors de la solidification de MCP [43].

II.4.3 Micro-encapsulation

La micro-encapsulation consiste à enfermer des matériaux (solides ou liquides) sous forme de micro-capsulation de taille micrométrique[59]. Cette technique utilise des enveloppes composées de polymères naturels ou synthétique, obtenues par différents procédés comme le spray-drying ou coacervation [60].

Appliquée aux matériaux à chargement de phase, elle permet d'intégrer une forte capacité de stockage thermique dans des matériaux de construction, leur conférant une double fonction [61]. Toutefois, cette technologie présente des limites, notamment un coût élevé, une faible densité de stockage due à la proportion importante d'enveloppe, et une réduction du transfert thermique convectif [60].

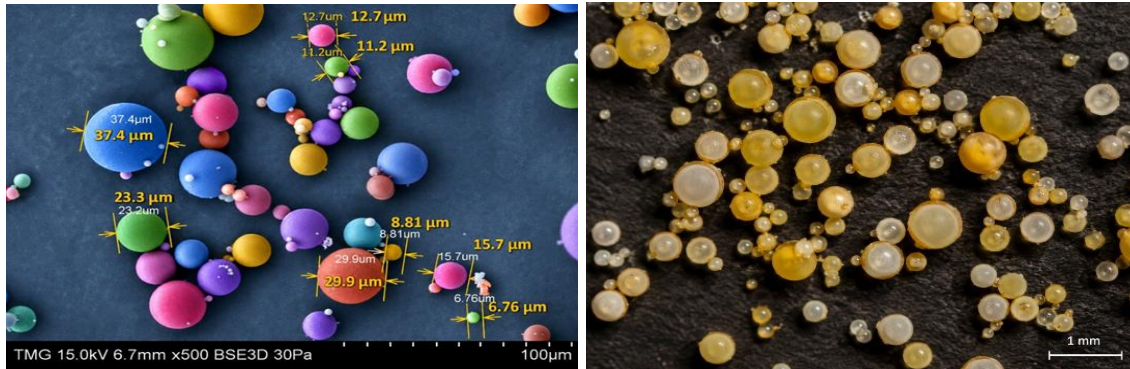


Figure II.5 : produit de MCP micro-encapsulation utilisé pour le stockage thermique dans le bâtiment [62].

II.4.4 Absorbé dans une matrice

Les matériaux à changement de phase peuvent être intégrés dans une matrice solide telle que des poudres, des granulés ou des supports poreux, comme illustré à la figure II.8 [43]. Dans ce type de configuration, le MCP est confiné au sien du matériau support, ce qui empêche toute fuite lors des cycles successifs de fusion et de solidification [47]. Cette technique d'encapsulation permet de stabiliser le matériau tout en préservant ses propriétés thermiques.

Ainsi, l'intégration des MCP dans des matrices solides constitue une approche efficace pour améliorer la capacité de stockage thermique des matériaux de construction et optimiser la performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment [43].

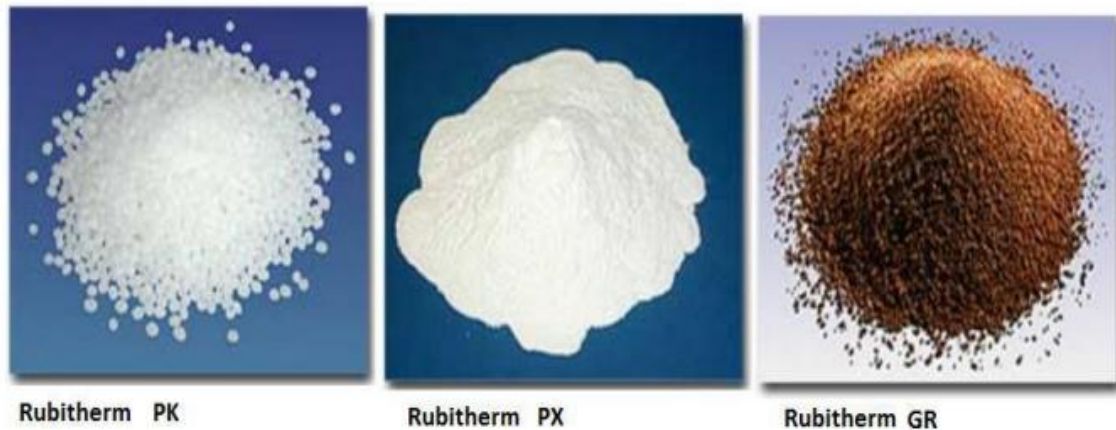


Figure II.7: Les différentes formes d'encapsulation [63]

II.4.5 Matériaux à changement de phase à forme stabilisée

Les matériaux à changement de phase à forme stabilisé (SSPCM) constituent une nouvelle classe de matériaux composites combinant un matériau à changement de phase et un matériau support [64]. Ils sont obtenus à partir d'un mélange liquide de MCP et de matériau support, qui est ensuite refroidi en dessous de la température de transition vitreuse du support jusqu'à sa solidification [64].

Le matériau support le plus couramment utilisé est le polyéthylène haute densité (HDPE), permettant d'incorporer jusqu'à 80 % en masse de MCP. Tant que la température de fonctionnement des SSPCM reste inférieure à la température de fusion du matériau support, celui-ci conserve sa forme et assure la stabilisation du système [64].

Les SSPCM présentent une bonne capacité thermique massique, mais leur conductivité thermique peut être réactivement faible. Celle-ci peut toutefois être améliorée par l'ajoute de graphite [60].

II.5 Conclusion

Les matériaux à changements de phase représentent une solution efficace pour améliorer les performances énergétiques et le confort thermique des bâtiments [43]. Leur capacité à stocker et restituer la chaleur permet de réduire les besoins en chauffage et en climatisation,

Chapitre II : Matériaux à changement de phase dans les bâtiments

aussi bien dans les bâtiments climatisés que dans les constructions passives. Grace à leur intégration dans les murs, toitures, planchers et systèmes de ventilation, les MCP contribuent à la réduction de la consommation énergétique et au déplacement des charges de points. Malgré leurs avantages thermiques importants, des études complémentaires restent nécessaires afin d'optimiser leur coût, leur durabilité et leur application à grande échelle dans le secteur du bâtiment.

CHAPITRE III

***« Modélisation Numérique et
Méthodologie de Simulation »***

III.1 Introduction

Ce chapitre présente ANSYS Fluent, le logiciel de dynamique des fluides computationnelle (CFD) utilisé pour simuler le comportement thermique d'un mur composite intégrant un matériau à changement de phase (PCM). Les capacités avancées de modélisation offertes par ce logiciel permettent d'analyser avec précision les phénomènes de transfert de chaleur, ainsi que l'impact du PCM sur l'amélioration du confort thermique à l'intérieur des bâtiments.

III.1.1 Qu'est-ce que la CFD

La CFD, i.e. « Computational Fluid Dynamics » (soit en français : Dynamique des Fluides Numérique) est un ensemble de méthodes numériques permettant d'obtenir une solution approximative d'un problème de dynamique des fluides et/ou de transfert thermique. Les équations qui interviennent sont celles des mécaniques des fluides, résolues par des méthodes numériques. La solution est approximative et non pas exacte pour plusieurs raisons : D'abord, parce qu'on résout les équations de Navier-Stokes numériquement en les discrétisant. Deuxièmement, et comme on le verra un peu plus loin, pour des raisons de limitation de la puissance de calcul et de mémoire, certains termes des équations à résoudre sont remplacés par des modèles empiriques de turbulence qui ne sont pas exacts. Cependant, grâce au développement des méthodes numériques et à des calculateurs de plus en plus puissants avec une grande capacité de mathématique et simulation numérique, la CFD permet d'avoir des solutions très satisfaisantes. Ceci est encore plus vrai dans l'industrie où très souvent on ne s'intéresse qu'aux valeurs moyennes et aux ordres de grandeur d'un problème donné [65].

III.2 Présentation du logiciel ANSYS Fluent

ANSYS FLUENT est un logiciel de simulation CFD qui permet de modéliser l'écoulement du fluide, le transfert de chaleur, et les réactions chimiques dans des géométries complexes. Ce programme est écrit dans le langage C de programmation et permet d'utiliser pleinement la flexibilité et la puissance offerte par cette langue. ANSYS FLUENT utilise une architecture client- serveur, ce qui lui permet d'exécuter des processus simultanés distinctes sur plusieurs postes de travail client et serveurs de calcul puissants. Cette architecture est essentielle pour une exécution efficace, un contrôle interactif, et une flexibilité totale entre les différents types de machines ou de systèmes d'exploitation [66] .

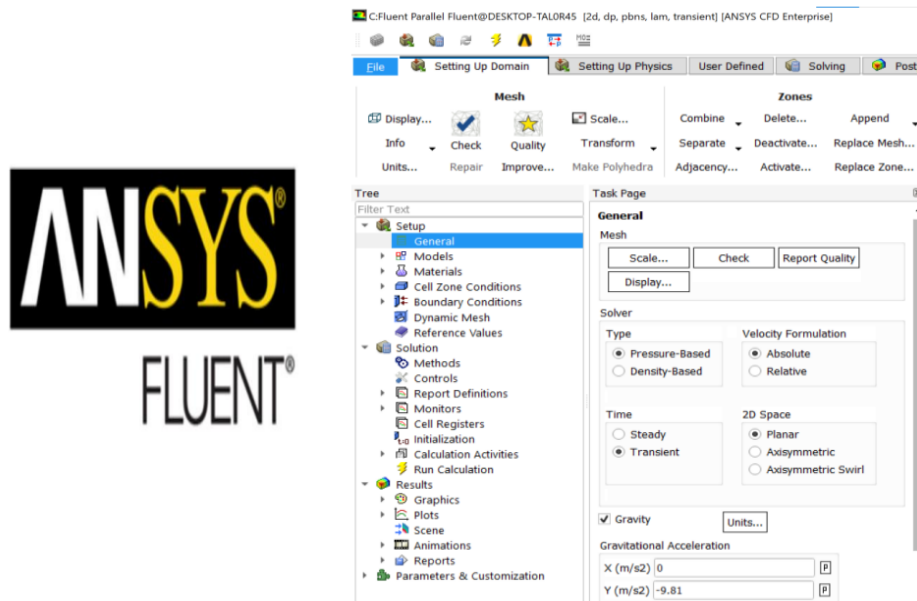


Figure III.1 : Vue générale sur ansys fluent [66]

III.2.1 Définition de modélisation numérique

La modélisation est la représentation d'un système par un modèle. C'est aussi la construction du modèle. La « simulation » a pour but de faire vivre un système. C'est une méthode qui consiste à utiliser un modèle comme substitut de la réalité. Un modèle mathématique ou numérique désigne un algorithme, et on peut parler de logiciel ou programme lorsqu'il s'agit d'un modèle de simulation [67].

Les équations qui permettent de décrire un problème de transfert thermique sont : l'équation de continuité, l'équation de conservation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie.

- **Équation de continuité**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{III.1}$$

- **Équation de conservation de la quantité de mouvement**

Suivant x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_u \quad \text{III.2}$$

Suivant y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_c) + S_v \quad \text{III.3}$$

- **Équation de conservation de l'énergie**

$$\frac{\partial}{\partial t} (C_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (u C_p T) + \frac{\partial}{\partial y} (v C_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\kappa}{\rho_0} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\kappa}{\rho_0} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad \text{III.4}$$

En introduisant l'enthalpie $h = c_p T$ et l'enthalpie de la phase solide $h_s = c_s T$, l'équation d'énergie sera :

$$\frac{\partial}{\partial t} (h) + \frac{\partial}{\partial x} (uh) + \frac{\partial}{\partial y} (vh) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\kappa}{\rho_0 c_s} \frac{\partial h_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\kappa}{\rho_0 c_s} \frac{\partial h_s}{\partial y} \right) \quad \text{III.5}$$

Ou encore :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (h) + \frac{\partial}{\partial x} (uh) + \frac{\partial}{\partial y} (vh) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\kappa}{\rho_0 c_s} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y} \frac{\kappa}{\rho_0 c_s} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\ &+ \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\kappa}{\rho_0 c_s} \frac{\partial (h_s - h)}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\rho_0 c_s} \frac{\partial (h_s - h)}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad \text{III.6}$$

III.3 La méthode d'enthalpie-porosité

La modélisation numérique des phénomènes de fusion et de solidification des matériaux à changement de phase constitue un défi important en mécanique des fluides et en transfert thermique. En effet, ces phénomènes impliquent simultanément des échanges de chaleur sensible, de chaleur latente, ainsi que des effets d'écoulement du fluide dans la phase liquide.

Pour traiter ce type de problème, la méthode d'enthalpie-porosité est couramment adoptée. Cette approche repose sur une formulation enthalpique de l'équation d'énergie, dans laquelle la chaleur latente est intégrée directement dans le terme d'enthalpie totale. Ainsi, le changement de phase est pris en compte sans nécessiter un suivi explicite de l'interface solide-liquide.

Le principe fondamental de cette méthode consiste à assimiler la zone de transition (appelée zone pâteuse) à un milieu poreux fictif. La perméabilité de ce milieu dépend de la fraction liquide :

Chapitre III : Modélisation numérique et méthodologie de simulation

- Lorsque le matériau est totalement solide, les vitesses sont annulées,
- Lorsqu'il est totalement liquide, l'écoulement est libre,
- Dans la zone intermédiaire, l'écoulement est progressivement freiné.

Ce comportement est généralement modélisé par l'ajout d'un terme source dans l'équation de quantité de mouvement, souvent basé sur une loi de type Darcy, afin de représenter la résistance à l'écoulement dans les régions partiellement solides.

L'un des principaux avantages de cette méthode est sa simplicité de mise en œuvre et sa capacité à traiter des géométries complexes sans suivre explicitement le front de phase. Elle est largement utilisée dans les codes de calcul comme ANSYS Fluent, où elle est intégrée de manière standard pour la simulation des processus de fusion et de solidification.

III.4 Méthodologie sous FLUENT

III.4.1 Création de la géométrie

La première étape de la simulation numérique consiste à définir la géométrie du domaine d'étude. Cette étape est essentielle car elle conditionne la précision et la pertinence des résultats obtenus [68], [69] .

La géométrie peut être réalisée à l'aide d'outils intégrés à la plateforme ANSYS Workbench, notamment Design Modeler ou Space Claim, ou importée depuis un logiciel de CAO externe (tel que SolidWorks ou CATIA) [70].

Dans le cadre de cette étude, la procédure adoptée est la suivante :

- Définition du domaine physique : représentation du système réel à étudier.
- Simplification géométrique
- Définition des frontières : identification des différentes surfaces, qui seront utilisées plus tard pour appliquer les conditions aux limites [70].

Une attention particulière doit être portée à la qualité de la géométrie, notamment :

- Absence de discontinuités,
- Surfaces fermées et étanches,
- Absence de volumes parasites.

Enfin, la géométrie est sauvegardée puis transférée vers l'étape suivante, à savoir le maillage (*meshing*), qui consiste à discrétiser le domaine en éléments finis [68].

III.4.2 Maillage

Le maillage est une étape clé en simulation numérique. Il consiste à subdiviser le domaine géométrique en un ensemble de cellules discrètes pour résoudre les équations gouvernantes. La qualité du maillage influence la précision des résultats, le temps de calcul et la stabilité de la solution [68], [71].

Deux principes ont été respectés dans ce mémoire :

- Utiliser un maillage structuré.
- Appliquer un raffinement du maillage près des parois.

➤ **Maillage structuré recommandé**

Un maillage structuré est composé d'éléments organisés régulièrement selon une topologie quadrilatérale (2D) ou hexamétrique (3D). Il présente plusieurs avantages :

- Meilleure précision pour un même nombre de cellules.
- Convergence plus rapide des solutions.
- Réduction du temps de calcul [9].

➤ **Raffinement près des parois**

Près des parois, les gradients de température sont très élevés en raison des effets de la couche limite thermique et des phénomènes de changement de phase. Afin de bien capturer ces variations, le maillage doit être affiné dans ces zones [72].

Le raffinement permet de :

- Mieux résoudre les variations rapides des grandeurs physiques.
- Améliorer la précision des flux thermique et des coefficients de transfert.
- Assurer une meilleure prédiction des forces de frottement.

III.5 Paramétrage dans Fluent

Dans cette étape, les propriétés des matériaux utilisés ainsi que les conditions aux limites de problèmes sont définies. Les propriétés thermo physiques du matériau à changement de phase, telles que la densité, la capacité calorifique, la conductivité thermique, la chaleur latente, ainsi que les températures de solidus et de liquidus, sont introduites afin de décrire avec

précision le comportement thermique du système. Les conditions aux limites et initiales sont également spécifiées de manière à représenter les échanges thermiques avec l'environnement et à garantir un état initial cohérent.

Le paramétrage dans logiciel ANSYS Fluent repose sur l'activation de l'équation de l'énergie afin de prendre en compte les transferts thermiques par conduction et convection. L'activation de la gravité permet de modéliser la convection naturelle induite par les variations de densité dues aux gradients de température. Le modèle de solidification/fusion est utilisé pour simuler le changement de phase du matériau et suivre l'évolution de la fraction liquide ainsi que les échanges de chaleur latente.

La simulation est réalisée en régime transitoire afin de décrire l'évolution temporelle du phénomène. Un solveur basé sur la pression, adapté aux écoulements incompressibles, est employé avec des algorithmes de couplage pression-vitesse tels que SIMPLE, SIMPLEC ou d'autres variantes, assurant la stabilité numérique et la convergence des résultats.

III.6 Description du modèle physique

Le modèle physique étudié s'inspire des constructions courantes en maçonnerie de briques creuses, largement utilisées dans le secteur du bâtiment, notamment dans les régions à climat chaud et sec. Dans ce type de construction, les parois sont généralement constituées de blocs de brique formant des éléments de fermeture dont les caractéristiques thermiques influencent fortement le comportement énergétique du bâtiment. Dans le cadre de cette étude, une paroi représentative a été considérée afin d'analyser son comportement thermique sous sollicitations transitoires.

Un modèle numérique bidimensionnel a été développé à l'aide du logiciel ANSYS Fluent afin de simuler le transfert de chaleur à travers la paroi étudiée. La configuration de base est constituée de deux couches de brique de 200 mm d'épaisseur chacune, séparées par une cavité intermédiaire de 5 mm destinée à l'intégration du matériau à changement de phase. Une configuration de référence, sans intégration de MCP, a également été considérée afin de servir de base de comparaison pour l'évaluation des performances thermiques. Le modèle géométrique ainsi que ses dimensions sont présentés dans la Figure III.2.

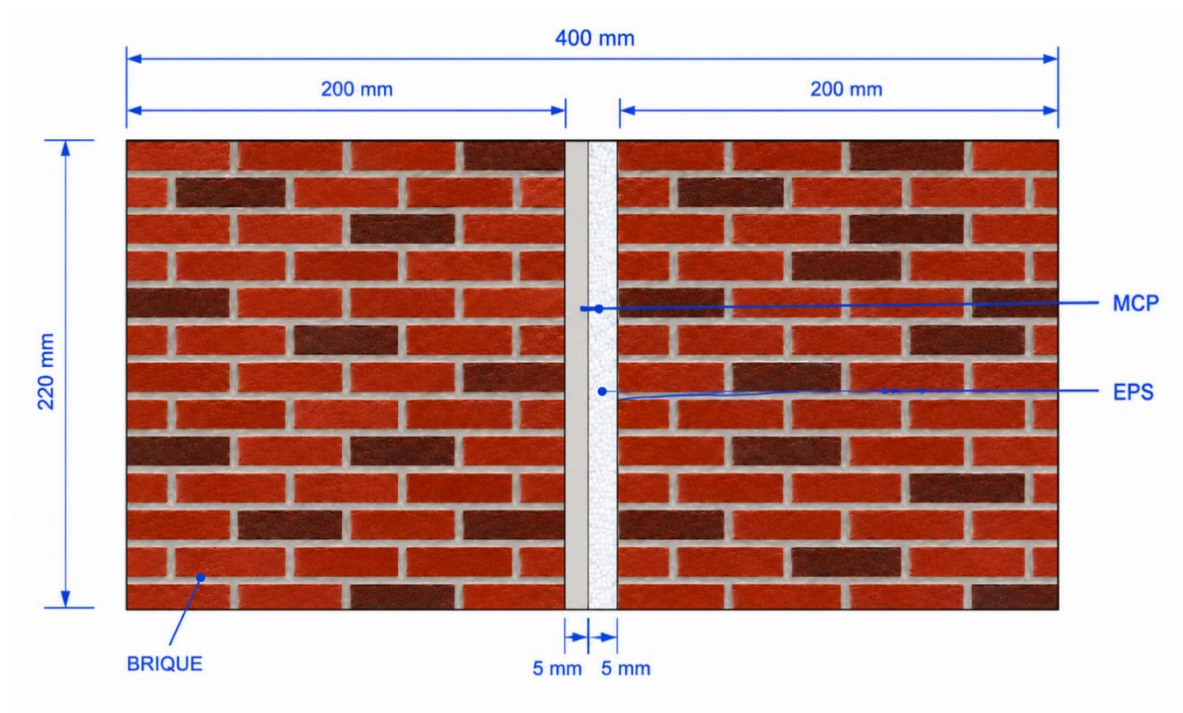


Figure III.2 : Configuration du modele étudié.

Dans un premier temps, une étude comparative a été réalisée en considérant trois types de PCM, à savoir le RT-27, le n-Eicosane et l'acide caprique, afin d'identifier le matériau le plus performant dans les conditions étudiées. Par la suite, le PCM optimal a été retenu pour une analyse approfondie portant sur l'influence de son épaisseur. Enfin, une configuration hybride a été développée en intégrant une couche d'isolation en polystyrène expansé (EPS), dans le but d'évaluer les performances thermiques résultant de la combinaison de deux techniques passives de refroidissement. Les résultats obtenus ont été systématiquement comparés à ceux de la configuration de référence sans PCM afin de quantifier l'impact des différentes solutions étudiées.

Tableau III.1 : Propriétés des matériaux utilisés.[73]

Matériau	Acide caprique	n-Eicosane	RT-27	Brique	EPS
Densité, (kg/m ³)	1018 (s) 888 (l)	885 (s) 778 (l)	870 (s) 760 (l)	1600	1190
Capacité thermique massique, (J/kg. k)	1900 (s) 2400 (l)	2010 (l) 2040 (s)	1800 (s) 2400 (l)	840	1470
Conductivité thermique, (W/m. k)	0.372 (s) 0.153 (l)	0.15	0.24 (s) 0.15 (l)	0.7	0.18
Viscosité, (Pa.s)	0.02664	0.00355	0.00342	-	-
Coefficient de dilatation thermique, (1/k)	0.001	0.001	0.005	-	-
Chaleur latente, (kJ/kg)	152.7	241	179	-	-
Température de solidification, (°C)	31	36	24	-	-
Température de liquidus, (°C)	33	38	27	-	-

III.7 Hypothèses de modélisation

Afin de simplifier la modélisation numérique du transfert thermique à travers la paroi étudiée, un certain nombre d'hypothèses ont été adoptées. Ces hypothèses permettent de réduire la complexité du problème tout en conservant une représentation fidèle du comportement physique du système :

- Le transfert de chaleur à travers la paroi est considéré bidimensionnel et instationnaire.
- L'écoulement du MCP à l'état liquide est supposé laminaire, incompressible et newtonien.
- Les propriétés thermo physiques des matériaux sont supposées constantes, à l'exception de celles du MCP (capacité calorifique et conductivité thermique), considérées variables avec la température.
- Les surfaces horizontales de la paroi (supérieure et inférieure) sont supposées adiabatiques, avec un flux thermique nul.

Chapitre III : Modélisation numérique et méthodologie de simulation

Sur la base des hypothèses précédemment adoptées, le comportement thermique du système est régi par les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, données par les équations III.7 à III.8

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad \text{III.7}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \cdot u) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + \rho g \quad \text{III.8}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_f} \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_f \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\rho \beta)_f g \Delta T \right] \quad \text{III.9}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda_f}{\rho_f C_{p,f}} \left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \right] \quad \text{III.10}$$

Où ρ représente la densité du fluide (kg/m^3), u et v les composantes de vitesse suivant les directions x et y (m/s), T la température ($^{\circ}\text{C}$), p la pression statique (Pa), μ la viscosité dynamique (Pa.s), β le coefficient de dilatation thermique volumique ($1/^{\circ}\text{C}$), λ la conductivité thermique (W/m.K) et C_p la capacité calorifique spécifique (J/kg.K).

Les effets de flottabilité dans la phase liquide du PCM sont pris en compte à travers le modèle de fusion-solidification implémenté dans ANSYS Fluent.

Pour les zones solides de la paroi, le transfert thermique est décrit par l'équation de conduction transitoire bidimensionnelle, représentée par l'équation III.11

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p u T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad \text{III.11}$$

Dans la zone contenant le matériau à changement de phase, les processus de fusion et de solidification sont modélisés à l'aide de la méthode enthalpie-porosité, régie par les équations III.12 à III.14. Dans cette approche, l'enthalpie totale comprend une composante

sensible et une composante latente. La fraction liquide f varie entre 0 et 1 selon la température du matériau, en fonction des températures de solidus et de liquidus.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad \text{III.12}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial (u_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial (u_j)}{\partial x_i} \right) \right] + \rho \beta g \Delta T + S_u \quad \text{III.13}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j H) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad \text{III.14}$$

III.8 Conditions aux limites

La surface intérieure de la paroi est soumise à un échange convectif avec l'air intérieur, caractérisé par un coefficient de convection et une température intérieure de référence :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{y=0} = h_{in} (T_{in} - T_s) \quad \text{III.15}$$

Avec :

$$h_{in} = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad \text{et} \quad T_{in} = 298 \text{ K} \quad \text{III.16}$$

La surface extérieure de la paroi est soumise à un échange convectif avec l'air ambiant. Le flux thermique est modélisé par la relation suivante :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{y=H} = h_{ex} (T_s - T_{ex}(t)) \quad \text{III.17}$$

Où h_{ex} représente le coefficient de convection extérieur, T_s la température de surface et $T_{ex}(t)$ la température de l'air extérieur variable dans le temps.

La température extérieure est modélisée par une fonction sinusoïdale représentant les conditions estivales d'un climat chaud et sec. Cette formulation permet de reproduire les

variations journalières de température entre le jour et la nuit, ce qui est essentiel pour l'évaluation du comportement thermique des matériaux à changement de phase.

$$T_{ex}(t) = 303 + 7 \sin \frac{2\pi t}{24} \quad \text{III.18}$$

Le coefficient de convection extérieur est fixé à :

$$h_{ex} = 20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad \text{III.19}$$

III.9 Validation du modèle

La validation du modèle numérique développé est une étape essentielle afin de garantir la fiabilité des résultats obtenus. Le modèle numérique développé dans cette étude a été réalisé à l'aide du logiciel de dynamique des fluides numérique ANSYS Fluent, permettant la résolution des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, ainsi que la prise en compte du processus de changement de phase du matériau à changement de phase. Afin d'évaluer la fiabilité et la précision de la méthodologie proposée, une étude de validation a été effectuée en comparant les résultats obtenus avec ceux d'un travail numérique de référence de Alawadhi et al [74], en reproduisant des conditions aux limites similaires. La comparaison des résultats, notamment l'évolution de la température au sein de la paroi, a montré un bon accord entre les deux études, comme illustré dans la Figure III,4. Les tendances des profils de température présentent une concordance satisfaisante, avec un écart relatif maximal faible, ce qui confirme la capacité du modèle à reproduire correctement le comportement thermique du système étudié et valide ainsi son utilisation pour l'analyse des différentes configurations.

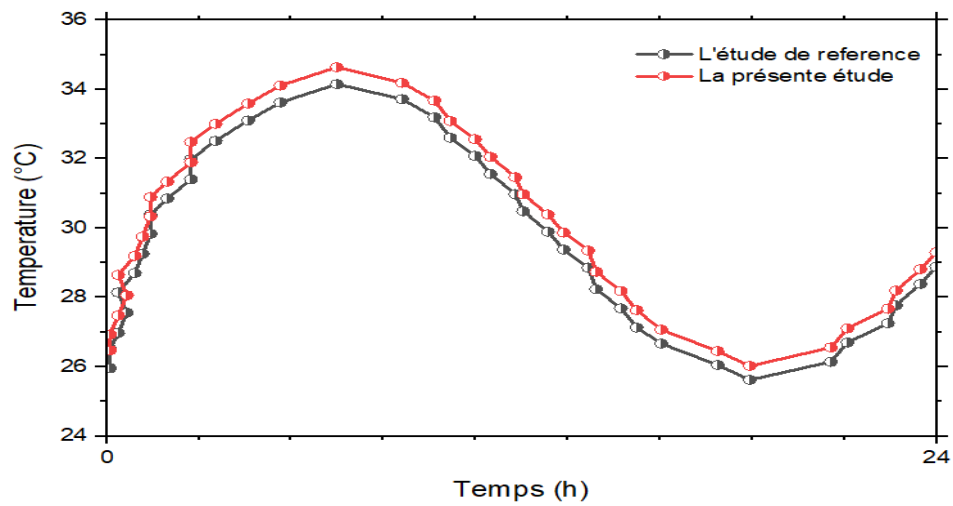


Figure II.3 : Validation du modèle numérique en comparaison les résultats.

Chapitre IV

« Résultats et Discussion »

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse paramétrique des performances thermiques d'une paroi intégrant des matériaux à changement de phase (MCP). L'objectif principal est d'évaluer l'influence de la plusieurs paramètres clés, notamment type de MCP, l'épaisseur de la couche intégrée ainsi que la combinaison du MCP avec des techniques passives de refroidissement.

Dans un premier temps, une étude comparative est menée afin d'examiner l'effet de différents types de MCP sur le comportement thermique de la paroi, en termes de température intérieure et de flux thermique. Ensuite, l'impact de l'épaisseur du MCP est analysé afin de déterminer son rôle dans l'amélioration de l'inertie thermique et la régulation des échanges de chaleur. Enfin, une approche hybride combinant le MCP avec une couche d'isolation en polystyrène expansé (EPS) est étudiée dans le but d'optimiser les performances thermiques globales du système.

Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre les mécanismes de stockage thermique latent et de mettre en évidence l'intérêt de ces solutions passives dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments.

IV.1 L'effet du type de MCP sur les performances thermiques

Afin d'évaluer l'influence de différents matériaux a changement de phase intégrés dans la paroi étudiée, trois types de PCM ont été considérées, à savoir le RT-27, le n-Eicosane et l'acide caprique. Le comportement thermique de la paroi intégrant ces PCM est comparé a celui d'une configuration de référence sans PCM ? afin d'évaluer l'efficacité du stockage température de la surface intérieure pour les différents cas est présentée dans la figure IV.1. Il est observé que l'intégration du MCP améliore significativement les performances thermiques en réduisant les fluctuations de la température intérieure. En effet, toutes les configurations avec MCP permettent un amortissement des variations thermiques par rapport au cas de référence. Les résultats obtenus montrent une amélioration notable des performances thermique de la paroi suite a l'intégration des matériaux a changement de phase. Dans le cas de référence (sans MCP), la température maximale de la surface intérieure atteint environ 37°C. L'intégration des MCP permet une réduction de ce pic thermique, avec des valeurs maximales d'environ 36°C pour le RT-27, 35 °C le n-Eicosane et 33°C pour l'acide caprique, ce dernier présentant les meilleures performances en termes d'atténuation thermique

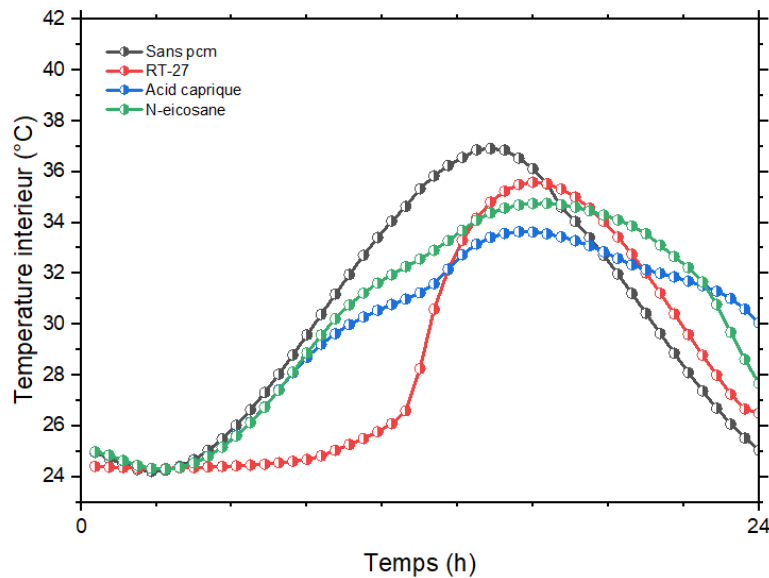


Figure IV.1 : Évolution de la température de la surface intérieure pour différents types de MCP.

L'évolution dynamique du flux thermique intérieur est représentée dans la figure IV.2.

Les résultats montrent que l'intégration du MCP entraîne une diminution notable du flux thermique maximal ainsi qu'un décalage de son occurrence dans le temps par rapport à la configuration de référence. Le flux maximal atteint environ 97 W/m² dans le cas de référence, tandis qu'il diminue à 80 W/m² pour le RT-27, 74 W/m² pour le n-Eicosane et 69 W/m² pour l'acide de caprique. Cette diminution traduit la capacité des matériaux à changement de phase à stocker une partie de l'énergie thermique sous forme latente, réduisant ainsi la quantité de chaleur transmise vers l'intérieur de la paroi.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment l'efficacité de l'intégration des MCP dans l'amélioration du comportement thermique de la paroi, avec une performance plus marquée pour l'acide caprique dans les conditions étudiées.

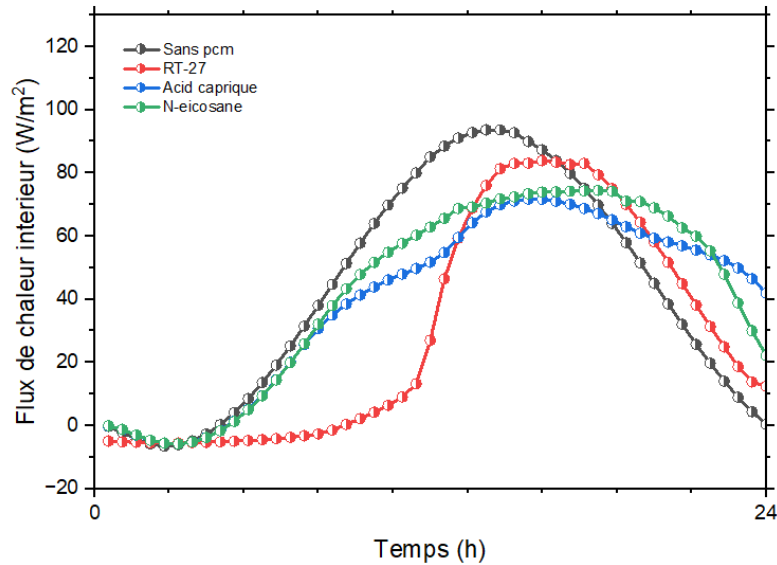


Figure IV.2 : Évolution du flux thermique intérieur pour différents types de MCP.

IV.2 L'effet de l'épaisseur du MCP sur les performances thermiques

Le MCP présentant les meilleures performances a été retenu afin d'approfondir l'analyse de l'influence de son épaisseur sur le comportement thermique de la paroi. Dans cette optique, trois épaisseurs différentes de la couche de MCP ont été considérées, à savoir 2.5 mm, 5 mm et 7.5 mm l'évolution de la température de la surface intérieure est analysée afin d'évaluer l'impact de ce paramètre géométrique sur la régulation thermique du système.

Les résultats obtenus montrent que l'épaisseur de la couche de MCP influence significativement la température intérieure de paroi. Une augmentation de l'épaisseur permet une amélioration de l'inertie thermique, ce qui se traduit par une réduction plus marquée des fluctuations de température. Le pic de température diminue progressivement lorsque l'épaisseur du MCP augmente, indique une meilleure capacité de régulation thermique pour la configuration la plus épaisses. Ce comportement s'explique par l'augmentation de la quantité de matériau disponible pour le stockage de l'énergie thermique sous forme latente, ce qui prolonge les phases de fusion et de solidification

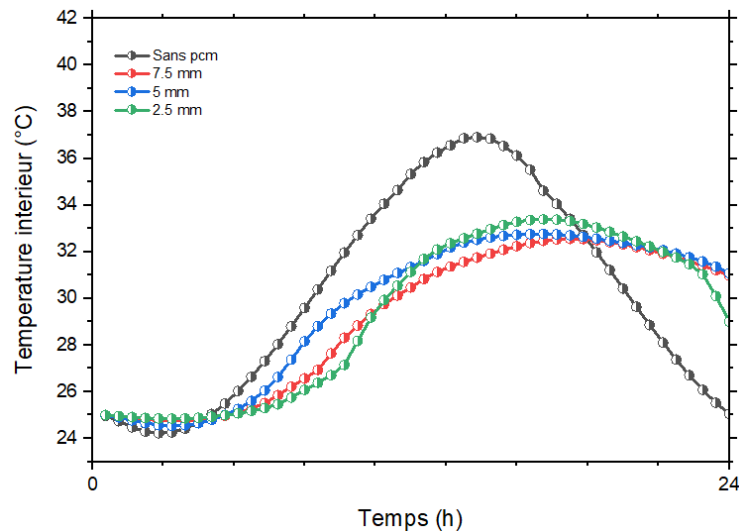


Figure IV.3 : Effet de l'épaisseur du MCP sur la température de la surface intérieure.

L'évolution du flux thermique intérieur en fonction de l'épaisseur de la couche de MCP est présentée dans la Figure IV.4 afin d'évaluer l'effet de ce paramètre sur les transferts de chaleur à travers la paroi. Les résultats montrent une influence notable de l'épaisseur du MCP sur le comportement thermique global du système. En effet, le flux thermique maximal diminue progressivement lorsque l'épaisseur de la couche de MCP augmente, ce qui traduit une amélioration de la capacité de la paroi à limiter les transferts de chaleur vers l'intérieur.

Cette tendance s'explique par l'augmentation de la quantité de matériau à changement de phase disponible pour le stockage d'énergie sous forme latente. Une épaisseur plus importante permet au MCP d'absorber une plus grande quantité de chaleur durant la phase de fusion, retardant ainsi la transmission de l'énergie thermique vers l'environnement intérieur. Par conséquent, les configurations les plus épaisses présentent une meilleure inertie thermique, caractérisée par une atténuation plus marquée des pics de flux et un étalement des charges thermiques dans le temps. Ainsi, l'augmentation de l'épaisseur de la couche de MCP contribue non seulement à réduire l'intensité du flux thermique transmis, mais également à améliorer la régulation temporelle des échanges thermiques à travers la paroi. Cela conduit globalement à une optimisation des performances thermiques du système étudié, en particulier dans des conditions de sollicitation thermique transitoire.

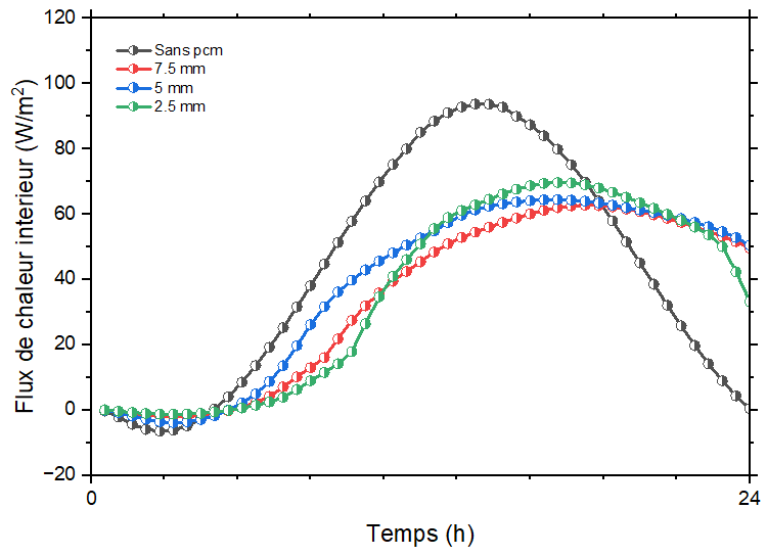


Figure IV.4 : Effet de l'épaisseur du MCP sur le flux thermique intérieur.

IV.3 L'effet d'utilisation de deux techniques passives de refroidissement

L'effet de la combinaison de deux technique passives de refroidissement, à savoir l'intégration du matériau à changement de phase et l'ajout d'une couche d'isolation en polystyrène expansé (EPS) est étudié afin d'évaluer l'amélioration globale des performances thermique de la paroi. Les résultats obtenus sont comparés non seulement à la configuration intégrant uniquement le MCP, mais également au cas de référence sans MCP, afin de quantifier l'apport de cette approche hybride.

L'évolution de la température de la surface intérieure , illustrée dans la Figure IV.5, montre que la combinaison MCP-EPS améliore davantage les performances thermiques par rapport aux autre configuration étudiées .En effet ,dans le cas de référence sans MCP , le pic de température intérieure atteint 37°C , tandis qu'il diminue à 33°C avec l'intégration du MCP seul ,puis à environ 32°C lorsque MCP est combiné avec l'EPS .Bien que la réduction supplémentaire apportée par l'EPS paraisse modérée en valeur absolue ,elle s'accompagne d'un déphasage thermique plus important , traduisant un retard dans la transmission du pic de chaleur vers l'intérieur .Ce comportement met en évidence une synergie entre le stockage latent assuré par le MCP et la résistance thermique additionnelle apportée par l'EPS , conduisant à une meilleure régulation thermique et à une amélioration de l'inertie globale de paroi

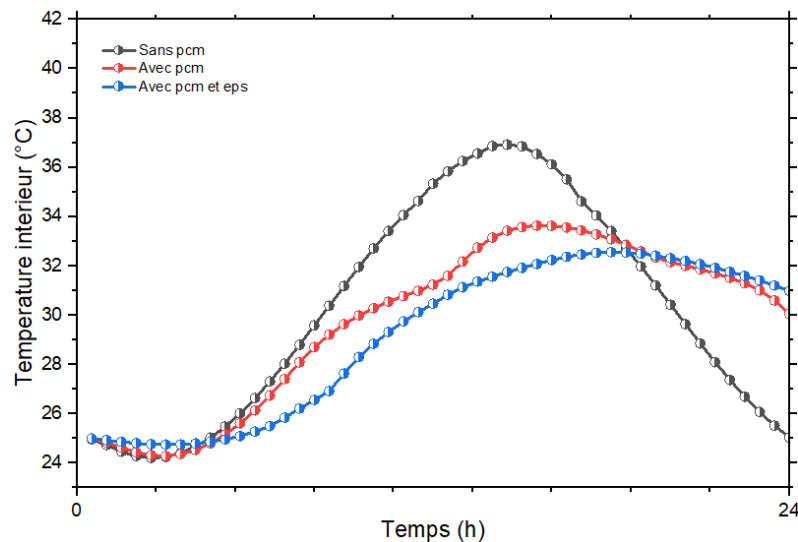


Figure IV.5 : Impact de la combinaison MCP_EPS sur la température de la surface intérieure.

L'évolution du flux thermique intérieur, présentée dans la Figure IV.6, confirme cette tendance. Le flux thermique maximal, d'environ 97 W/m² dans le cas de référence, diminue à 69 W/m² avec le MCP seul, puis à 60 W/m² pour la configuration combinée MCP-EPS. Cette réduction plus marquée traduit l'efficacité de l'approche hybride à limiter les gains thermiques transmis vers l'espace intérieur. D'un point de vue physique, le MCP absorbe une partie de l'énergie thermique sous forme latente durant la fusion, tandis que l'EPS agit comme une barrière supplémentaire réduisant les transferts conductifs. L'action combinée de ces deux mécanismes permet non seulement d'atténuer les pics de flux, mais aussi de lisser les charges thermiques sur une période plus longue, ce qui constitue un avantage important pour la réduction des besoins de refroidissement.

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence que la combinaison des deux techniques passives offre de meilleures performances que leur utilisation séparée, en exploitant simultanément les effets de stockage thermique latent et d'isolation, ce qui renforce l'efficacité globale du système étudié.

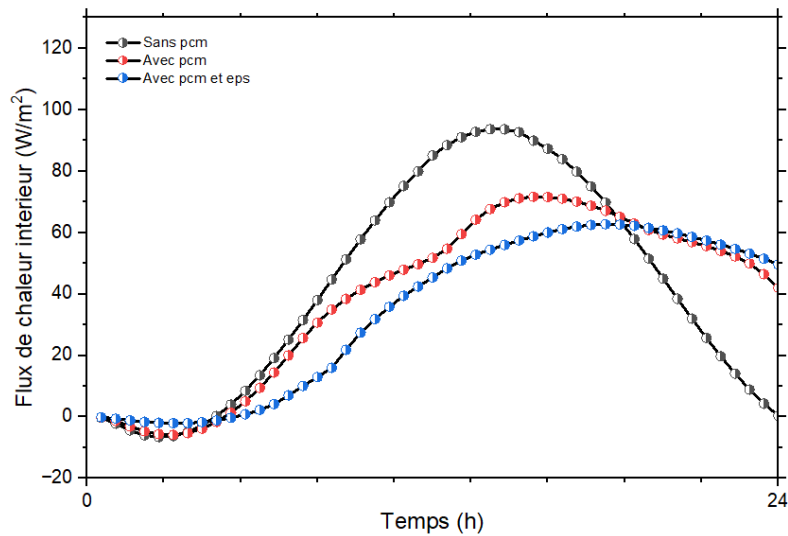


Figure IV.6 : Impact de la combinaison MCP_EPS sur le flux thermique intérieur.

Conclusion

Dans ce chapitre, une étude paramétrique a permis d'analyser l'influence du type de matériau à changement de phase, de l'épaisseur de la couche de MCP ainsi que de la combinaison du MCP avec une couche d'isolation en EPS sur les performances thermiques de la paroi étudiée. Les résultats ont montré que l'intégration des MCP améliore le comportement thermique de la paroi en réduisant les fluctuations de température intérieure et les pics de flux thermique. Parmi les matériaux étudiés, l'acide caprique a présenté les meilleures performances. L'augmentation de l'épaisseur du MCP a également permis d'améliorer la capacité de stockage thermique et de renforcer l'inertie de la paroi. Enfin, la combinaison du MCP avec l'EPS a conduit aux meilleures performances thermiques grâce à l'effet complémentaire entre stockage latent et isolation thermique. Ces résultats confirment l'intérêt de ces techniques passives pour améliorer l'efficacité énergétique des enveloppes de bâtiments.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de cette étude, il apparaît clairement que l'intégration des matériaux à changement de phase au sein des murs composites constitue une solution efficace pour améliorer les performances thermiques des bâtiments. Grâce à leur capacité à stockage de chaleur latente, les MCP permettent de réduire les fluctuations de température, de retarder les pics thermique et d'augmenter l'inertie thermique des parois.

La modélisation numérique, basée sur l'approche enthalpie-porosité, a permis de décrire de manière satisfaisante le comportement thermique du mur composite en présence de changement de phase. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence significative de plusieurs paramètres, notamment les propriétés thermophysiques du MCP, son emplacement dans la structure du mur, ainsi que les conditions climatiques extérieures.

L'analyse des résultats a montré que l'utilisation des MCP contribue à une amélioration notable du confort thermique intérieur, en particulier en réduisant les variations de température et en limitant les besoins en chauffage et en climatisation. Toutefois, l'efficacité de cette solution dépend fortement du choix approprié du matériau MCP et de son intégration optimale dans la paroi.

En perspective, ce travail pourrait être approfondi par l'étude expérimental des configurations proposées afin de valider les résultats numériques. De plus, l'exploration de nouveaux matériaux MCP, notamment les matériaux composites et nano-améliorés, ainsi que l'intégration de conditions réelles d'exploitation (variabilité climatique, occupation du bâtiment), permettrait d'affiner davantage les performances du système étudié.

Enfin, l'intégration des MCP dans les stratégies globales de conception bioclimatiques et de bâtiments intelligents représente une voie prometteuse pour répondre aux enjeux énergétique et environnementaux actuels. En combinant ces matériaux avec d'autres solutions passives et actives, il devient possible de concevoir des bâtiments à haute efficacité énergétique, capables d'assurer un confort thermique optimal tout en réduisant leur empreinte carbone.

*Références
Bibliographiques*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Y. Zerdane, J. F. Largeau, N. Akkouche, M. Hachemi, et M. Tazerout, « Catalytic effects of eggshell ash on the conversion of used engine oil to fuel by pyrolysis », *Chemical Engineering Communications*, vol. 210, n° 7, p. 1195-1206, juill. 2023, doi: 10.1080/00986445.2022.2067749.
- [2] « Traite D'architecture Et D'urbanisme Bioclimatique - LIEBARD Alain, de HERDE Andre PDF | PDF | Développement durable | Efficacité énergétique », Scribd. Consulté le: 21 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.scribd.com/document/99078457/Traite-Archi-Urba-Bioclimatiques>
- [3] « Statistical Review of World Energy 2022 ».
- [4] A. A. Lacis, G. A. Schmidt, D. Rind, et R. A. Ruedy, « Atmospheric CO₂: Principal Control Knob Governing Earth's Temperature », *Science*, vol. 330, n° 6002, p. 356-359, oct. 2010, doi: 10.1126/science.1190653.
- [5] A. Hayek, « L'impact environnemental du changement climatique, une corrélation avec le cycle hydrologique et la concentration de la pollution dans la région Litani ».
- [6] E. W. Maibach, M. Sarfaty, M. Mitchell, et R. Gould, « Limiting global warming to 1.5 to 2.0°C—A unique and necessary role for health professionals », *PLOS Medicine*, vol. 16, n° 5, p. e1002804, mai 2019, doi: 10.1371/journal.pmed.1002804.
- [7] Z. Hausfather et G. P. Peters, « Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading », *Nature*, vol. 577, n° 7792, p. 618-620, janv. 2020, doi: 10.1038/d41586-020-00177-3.
- [8] Akroum, H. (2019)., « Akroum, H. (2019). Application d'efficacité énergétique dans le bâtiment [Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen]. DSpace ».
- [9] Astrid denker, dr s.m k el hassar, saad baradiy.2014., « Astrid denker, dr s.m k el hassar, saad baradiy.2014. Guide pour la construction eco-energetique en algerie. ».
- [10] «
Polycopie_Lynda_Amel_Bouayed_née_Chaabane_intituleThermique_du_batiment.pdf
». Consulté le: 5 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: http://ww.univ-sba.dz/ft/images/Polycopie/2023-2024/Polycopie_Lynda_Amel_Bouayed_n%C3%A9e_Chaabane_intituleThermique_du_batiment.pdf
- [11] Bouayed, L. A. (2024)., « Bouayed, L. A. (2024). Thermique du Bâtiment : Polycopié [Support de cours]. Faculté de Technologie, Université Djillali Liabes - Sidi Bel Abbès. ».
- [12] Z. Fang, N. Li, B. Li, G. Luo, et Y. Huang, « The effect of building envelope insulation on cooling energy consumption in summer », *Energy and Buildings*, vol. 77, p. 197-205, juill. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.030.
- [13] B. M. Nazih et B. M. Benali, « ETUDE DU TRANSFERT THERMIQUE DANS LE BATIMENT ».
- [14] L. Chahwane, « Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments ».
- [15] Aubin Pauline & A (2017), « Aubin Pauline & A (2017), «ISOLATION THERMIQUE ET EFFICACITE ENERGETIQUE», Article, 2017 », [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.scribd.com/document/492789888/Rapport-P6-2017-39>

Références bibliographiques

- [16] « schoolmouv (2021-2022), «Transferts thermiques», Fiche de cours, [Site Web], Consulté le : 17 Mai 2022 », [En ligne]. Disponible sur : <https://www.schoolmouv.fr/cours/>
- [17] vent (DJERADI, K., & LAGRAA, A.2019), « DJERADI, K., & LAGRAA, A. (2019). Etude numérique de la conduction thermique bidimensionnelle en régime stationnaire dans une ailette (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-). ».
- [18] Medjelekh, D. (2006), « Medjelekh, D. (2006). Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment cas de l'habitation de l'époque coloniale à guelma. Mémoire magister. option: Architecture Bioclimatique. Université Mentouri de Constantine. ».
- [19] « Gwenan Ingénierie. (2012) « Caractéristique thermique dynamique, physique du bâtiment ». ».
- [20] Chakali, M. (2019), « Chakali, M. (2019). L'impact de la fenêtre sur le comportement thermique et respiratoire dans les constructions à forte inertie dans les zones chaudes et arides (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra). »
- [21] Asan, H. (2006)., « Asan, H. (2006). Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials. building and environment, 41(5), 615-620. ».
- [22] L. Marletta et G. Evola, « THERMODYNAMIC ANALYSIS OF A HYBRID PHOTOVOLTAIC/THERMAL SOLAR COLLECTOR », *IJHT*, vol. 31, n° 02, p. 135-142, déc. 2013, doi: 10.18280/ijht.310218.
- [23] ASHRAE, « ASHRAE: American Society of Heating Refrigerating and Air conditionnig Engineers. ».
- [24] « ISO 10551 (International Standard Organization) : Evaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelle de jugements subjectifs. ».
- [25] Thelie. F, « Thelie. F et al, Les outils d'évaluation du confort thermique, Journée SFT/ CSTB, 04/02/2003, Nantes ».
- [26] Boukhari, B., & Naim, A. (2021)., « Boukhari, B., & Naim, A. (2021). Étude des performances thermiques et dynamiques des canaux de différentes formes en présence des nanofluides [Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen]. Faculté de Technologie. »
- [27] Lahcene, A. (2021-2022)., « Lahcene, A. (2021-2022). Stockage d'énergie [Mémoire de master]. Faculté de Technologie, Département Génie Mécanique, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbès ».
- [28] D. L. Abdelkader, « D. L. Abdelkader, « Stockaged'énergie Présentepar: ». ».
- [29] M. Bahrar, « Contribution au développement et à l'analyse d'une enveloppe de bâtiment multifonctionnelle dans le cadre de l'optimisation du confort dans l'habitat ».
- [30] (K. Edem n'tsoukpoe ,al.2009, « K. Edem n'tsoukpoe ,al. A review on long-term sorption solar energy storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (2009) 2385–2396 ».
- [31] GHAOUTI, Farah Sanaa. (2021)., « GHAOUTI, Farah Sanaa. (2021). Optimisation de stockage d'énergie thermique par voie expérimentale [Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen]. ».
- [32] SAID, Zafar, PANDEY, A. K., TIWARI et Arun Kumar, « et al. Nano-enhanced phase change materials: Fundamentals and applications. Progress in Energy and Combustion Science, 2024, vol. 104, p. 101162. ».
- [33] M. Mofijur et al., « , « Phase Change Materials (PCM) for Solar Energy Usages and Storage: An Overview », *Energies* », vol. 12, no 16, p. 3167, janv. 2019, doi: 10.3390/en12163167..

Références bibliographiques

- [34] N. Payam, F. Yashar, et J. Fatemeh, « « Phase Change Material (PCM) as the Smart Heat-Storing Concept: A Brief Review » », n° doi: 10.17352/ams.000029., mars 34apr. J.-C..
- [35] F. Agyenim, P. Eames, et M. Smyth, « « Experimental study on the melting and solidification behaviour of a medium temperature phase change storage material (Erythritol) system augmented with fins to power a LiBr/H₂O absorption cooling system », *Renew. Energy* », n° doi: 10.1016/j.renene.2010.06.005, janv. 108apr. J.-C..
- [36] M. Deffass et A. Laouer, « , « Intégration des matériaux à changement de phase (MCPs) comme système de stockage de la chaleur », . », vol. :8080/xmlui/handle/123456789/10971, avr. 2026, [En ligne]. Disponible sur: [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-jijel.dz>
- [37] A. van Aalst, « , « À la découverte des matériaux à changement de phase », Pluss Advanced Technologies - FR. », [En ligne]. Disponible sur: [En ligne]. Disponible sur: <https://plussat.eu/fr/blog/2023/10/13/decouvrez-les-mcp/>
- [38] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, and A. I. Fernández, « “Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* », avr. 1675, [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>
- [39] A. Abhat, « , « Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials », *Sol. Energy* », n° doi: 10.1016/0038-092X(83)90186-X., janv. 313apr. J.-C..
- [40] M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, et S. Al-Hallaj, « , « A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications », in *Thermal Energy Storage with Phase Change Materials*, CRC Press, 2021. ».
- [41] J. Petinelli, « , « PRODUITS PARAFFINEUX DANS LE DOMAINE DU STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE », 1980, Consulté le: 14 avril 2026. », [En ligne]. Disponible sur: [En ligne]. Disponible sur: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL8130384906>
- [42] C.K. Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlison, « C.K. Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlison. “Solar thermal energy storage in phase change materials”. *ASES Annual conf. USA*: s.n., 1992. ».
- [43] SHARMA, Atul, TYAGI, V. Veer, CHEN Carl R, « SHARMA, Atul, TYAGI, V. Veer, CHEN, Carl R., et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews* », vol. , no 2, p. 318-345 2009, [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- [44] Peippo, K., Kauranen, P., & Lund, P. D. (1991)., « A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating. *Energy and buildings*, 17(4), 259-270. ».
- [45] A. M. Khudhair and M. M. Farid, « “A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials,” *Energy Conversion and Management* », janv. 263apr. J.-C., [En ligne]. Disponible sur: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00131-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00131-6)
- [46] Kuznik et al. (2011), « Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J. J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 379–391. »
- [47] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, et H. Mehling, « « Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications », *Appl. Therm. Eng.* », n° doi: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8., févr. 251apr. J.-C., [En ligne]. Disponible sur: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
- [48] Turnpenny, J. R., Etheridge, D. W., & Reay, D. A. (2000), . « Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings. *Applied Thermal Engineering* »,.

Références bibliographiques

- [49] Heim, D., & Clarke, J. A. (2004)., « Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r. Energy and Buildings », n° 36(8), 795–805..
- [50] « Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). Springer. ».
- [51] Navarro, L., de Gracia, A., Niall, D., Castell, A., Browne, M., McCormack, S. J., Griffiths, P., & Cabeza, L. F. (2016)., « Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 2. Integration as passive system. Renewable Energy », n° 85, 1334–1356..
- [52] Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010)., « Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. Energy and Buildings », n° 42(9), 1361–1368..
- [53] Soares, N., Costa, J. J., Gaspar, A. R., & Santos, P. (2013)., « Review of PCM applications in buildings. Energy and Buildings », n° 59, 82–103..
- [54] Athienitis, A. K., Liu, C., Hawes, D., Banu, D., & Feldman, D. (1997)., « Thermal performance of a passive solar test-room with latent heat storage. Building and Environment », n° 32(5), 405–410..
- [55] He, B., & Setterwall, F. (2002)., « Phase change materials for energy storage in buildings. Energy Procedia / Elsevier studies. ».
- [56] Maha AHMAD, « Maha AHMAD << Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l’enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux a changement de phase, super Isolation, apports solaires >> ». Thèse de Docteur de L’université Joseph Fourier., 23 novembre 2004.
- [57] K. Alassaad, J. Minto, et P. Wilde, « « Enhancing Building Thermal Performance: A Review of Phase Change Material Integration » », juin 3200.
- [58] V. Basecq, « V. Basecq, “Développement d’un mur capteur-stockeur solaire pour le chauffage des bâtiments à très basse consommation d’énergie,” Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2015. ».
- [59] Hawlader, M. N. A., Uddin, M. S., & Khin, M. M. (2003), « Microencapsulated PCM thermal-energy storage system. Applied Energy », n° 74(1–2), 195–202., [En ligne]. Disponible sur: [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00146-0](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00146-0)
- [60] Zhang, H., & Wang, X. (2009)., « Fabrication and performances of microencapsulated phase change materials for thermal energy storage: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews », vol. 13(6–7), 1552–1568, [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.001>
- [61] Tyagi, V. V., & Buddhi, D. (2007)., « PCM thermal storage in buildings: A state of art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, . », 6), –1166 1146, [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.002>
- [62] Su, J. F., Wang, L. X., & Ren, L. (2007), . « Preparation and properties of microencapsulated paraffin with polymeric shells for thermal energy storage. Materials Chemistry and Physics », n° 103(2–3), 211–217., [En ligne]. Disponible sur: Su, J. F., Wang, L. X., & Ren, L. (2007)
- [63] Rubitherm GmbH, « PCM Product Documentation. »
- [64] Memon, S. A. (2014)., « Renewable and Sustainable Energy Reviews », n° 31, 870–906. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.042>, [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.042>
- [65] sellami ilyes, « sellami ilyes, blida, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://di.univblida.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/733/042-2018.pdf?sequence=1> ». 2018 42apr. J.-C. [En ligne]. Disponible sur: [En ligne]. Disponible sur: <https://di.univblida.dz>
- [66] ZERGUIT Nor El Houda, « « Etude expérimentale et numérique de l’écoulement à surface libre au-dessus du déversoir à seuil épais », Mlle ZERGUIT Nor El Houda, – Université ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN, 2018. f », [En ligne]. Disponible sur:

Références bibliographiques

- [En ligne]. Disponible sur:
<http://dspace.univtlemcen.dz/bitstream/112/13330/1/Ing.Hyd.Zerguit.pdf>
- [67] Kouyi, G. L. (2004)., « Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulaire dans les déversoirs d'orage », 2008 1971.
- [68] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007), . « An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd ed.). Pearson ».
- [69] Anderson, J. D. (1995)., « Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. McGraw-Hill. ».
- [70] ANSYS Inc. (2020). *ANSYS Fluent Theory Guide*.
- [71] « Computational Methods for Fluid Dynamics (3rd ed.). Springer », *Ferziger, J. H., & Perić, M. (2002)*.
- [72] ilcox, D. C. (2006)., « WTurbulence Modeling for CFD (3rd ed.). DCW Industries ».
- [73] M. R. Elmarghany, A. Radwan, M. A. Shouman, A. A. Khater, M. S. Salem, et O. Abdelrehim, « Year-long energy analysis of building brick filled with phase change materials », *Journal of Energy Storage*, vol. 50, p. 104605, juin 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104605.
- [74] M. M. El Idi et M. Karkri, « Heating and cooling conditions effects on the kinetic of phase change of PCM embedded in metal foam », *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 21, p. 100716, oct. 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100716.